



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

INOVACE 3D TISKÁRNY TYPU REP RAP

INNOVATION OF THE REP RAP 3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Zítka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Lukáš Zítka
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Inovace 3D tiskárny typu Rep Rap

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na inovaci a ověření funkčnosti 3D tiskárny typu Rep Rap. V teoretické části práce budou charakterizovány jednotlivé aditivní technologie. Praktická část práce bude zaměřena na provedení návrhu technických úprav tiskárny tak, aby bylo dosaženo zkvalitnění tisku, přičemž stávající provedení 3D tiskárny bude porovnáno s inovovaným řešením. Součástí praktické části práce bude testování nastavení tiskových parametrů, různých materiálů pro 3D tisk a nezbytné dokončovací operace. Práce bude ukončena zhodnocením použitelnosti inovovaného řešení 3D tiskárny v praxi.

Cíle diplomové práce:

1. Popis a rozbor aditivních technologií.
2. Charakteristika 3D tiskárny typu Rep Rap.
3. Experimentální část (využití 3D tiskárny v praxi).
4. Implementace výsledků do praxe.
5. Technicko-ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s., 2009. ISBN 978-80-2-4-4025.

GEBHARDT, A. Rapid Prototyping. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 3-446-21259-0.

SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojírenství. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

MARQUIS, F. D. S. a D. LEE. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na inovaci a ověření funkčnosti 3D tiskárny typu RepRap. V teoretické části práce jsou charakterizovány jednotlivé aditivní technologie. Praktická část práce je zaměřena na provedení návrhu technických úprav tiskárny tak, aby bylo dosaženo zkvalitnění tisku, přičemž stávající provedení 3D tiskárny je porovnáno s inovovaným řešením. Součástí praktické části práce je testování nastavení tiskových parametrů, různých materiálů pro 3D tisk a nezbytné dokončovací operace. Práce je ukončena zhodnocením použitelnosti inovovaného řešení 3D tiskárny v praxi.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, RepRap, FDM tisk, inovace

ABSTRACT

The present Master thesis is focused on innovation and verification of the functionality of a 3D RepRap. The theoretical part of the thesis characterizes individual additive technologies. The practical part is focused on the design of the technical modifications of the printer in order to achieve the quality of the printing, while the current 3D printer design is compared with the innovative solution. The practical part tests the setting of print parameters, various materials for 3D printing and necessary finishing operations. The thesis is completed by assessing the usability of the innovative solution; 3D printers in practice.

Key words

Additive technology, 3D printing, RepRap, FDM printing, innovation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÍTKA, Lukáš. *Inovace 3D tiskárny typu Rep Rap*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 69 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Inovace 3D tiskárny typu Rep Rap** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Lukáš Zítka

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat rodině i přátelům za dlouhodobou podporu při studiu, bez níž by vznik této práce nebyl možný. Děkuji tímto doc. Ing. Josefovi Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Poděkování patří firmě Fillamentum za poskytnutí materiální podpory. Dále také firmě Koh-i-noor Formex s.r.o. a LINET spol. s r.o. za umožnění použití jejich dílů v experimentální části diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	10
1.1 Popis procesu výroby aditivní technologie	11
1.1.1 Současný stav aditivních technologií ve světě	14
1.1.2 Využití aditivních technologií	15
1.2 Rozdělení aditivních technologií	16
1.2.1 Rapid Prototyping na bázi fotopolymerů	17
1.2.2 Rapid Prototyping na bázi práškových materiálů.....	18
1.2.3 Rapid Prototyping tuhých materiálů	21
1.2.4 Další technologie Rapid Prototyping	23
1.3 Legislativa aditivních technologií	24
2 CHARAKTERISTIKA 3D TISKARNY TYPU REP RAP	25
2.1 Historie RepRap	25
2.2 Open source řešení.....	25
2.3 Základní větve Rep Rap	26
2.4 Original Prusa	28
2.5 Vstupní data pro 3D tisk	29
2.5.1 Software pro 3D modelování	29
2.5.2 Reverzní inženýrství	29
2.5.3 Databáze 3D modelů.....	29
2.6 Nejvíce používané materiály pro FDM tisk.....	30
2.7 Dokončovací operace	32
2.8 Základní výpočtové vztahy pro stanovení nákladu na tisk	33
3 EXPERIMENT ČÁST – VYUŽITÍ 3D TISKÁRNY V PRAXI.....	34
3.1 Původní řešení 3D tiskárny typu RepRap	35
3.2 Inovované řešení 3D tiskárny typu RepRap	37
3.2.1 Original Prusa MK2S.....	38
3.2.2 Vzdálené ovládání 3D tiskárny	40
3.2.3 Box na 3D tiskárnu	40
3.2.4 Tlumící podložka pod tiskárnu	41

3.3	Demontáž původní 3D tiskárny	41
3.4	Sestavení inovovaného řešení	43
3.5	Testované modely	46
3.5.1	Stěrka na lepidlo (Koh-I-Noor)	46
3.5.2	Krytka rohu (Linet)	46
3.5.3	Lev.....	47
3.6	Testované materiály	47
3.6.1	Nastavení parametrů tisku 3D tiskárny	47
3.6.2	Tisk stěrky na lepidlo	48
3.6.3	Tisk prototypu krytky rohu	50
3.6.4	Tisk modelu Iva	53
3.7	Dokončovací operace	55
3.8	Návrhy na další inovace	56
4	IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ DO PRAXE.....	57
4.1	Představení společnosti Koh-I-Noor Formex s.r.o.	57
4.2	Využití v podmínkách společnosti Koh-I-Noor Formex	58
4.3	Využití inovovaného řešení v domácnosti a pro osobní použití	60
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	61
5.1	Vyhodnocení nákladů na inovované řešení	62
5.2	Vyhodnocení vybraných parametrů před inovací a po inovaci 3D tiskárny 63	
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68

ÚVOD

V roce 1920 dopsal Karel Čapek utopické drama R.U.R.. Začátek děje se odehrává v továrně na výrobu robotů androidů, kteří vypadají jako skutečné lidské klony. Roboti jsou sestaveni proto, aby sloužili lidem. Mohou však zcela jasně uvažovat a jednat ve svůj prospěch. Čapek varuje před negativními vlivy techniky, které by se mohly časem lidem vymknout z rukou a stát se jejich záhubou [1]. Slovo inovace pochází z latinského slova innovare. V překladu znamená obnovovat, zdokonalovat zavádět něco nového.

Podmětem pro zpracování diplomové práce na toto téma byl zájem autora o 3D tisk, a také skutečnost, že téměř po 100 letech od sepsání Čapkova R.U.R. stojíme před čtvrtou průmyslovou revolucí, označovanou, jako Průmysl 4.0, která potrvá ještě nejméně 20 let. Její podstatou je mimo digitalizace také nahrazení manuální lidské práce prací robota a snahou, aby se roboti učili a dokázali být časem autonomní. Doufejme, že se poselství Čapka nenaplní a v blízké budoucnosti lidstvu nehrozí plné nahrazení roboty.

3D tisk dnes nachází uplatnění nejen v prototypování automobilovém průmyslu, ale také ve zdravotnictví, letectví, kosmonautice, šperkařství, designu, architektuře, stavebnictví, školství, marketingu a dalších odvětvích. Aditivní technologie jsou doplněním, i alternativou pro klasické konvenční technologie.

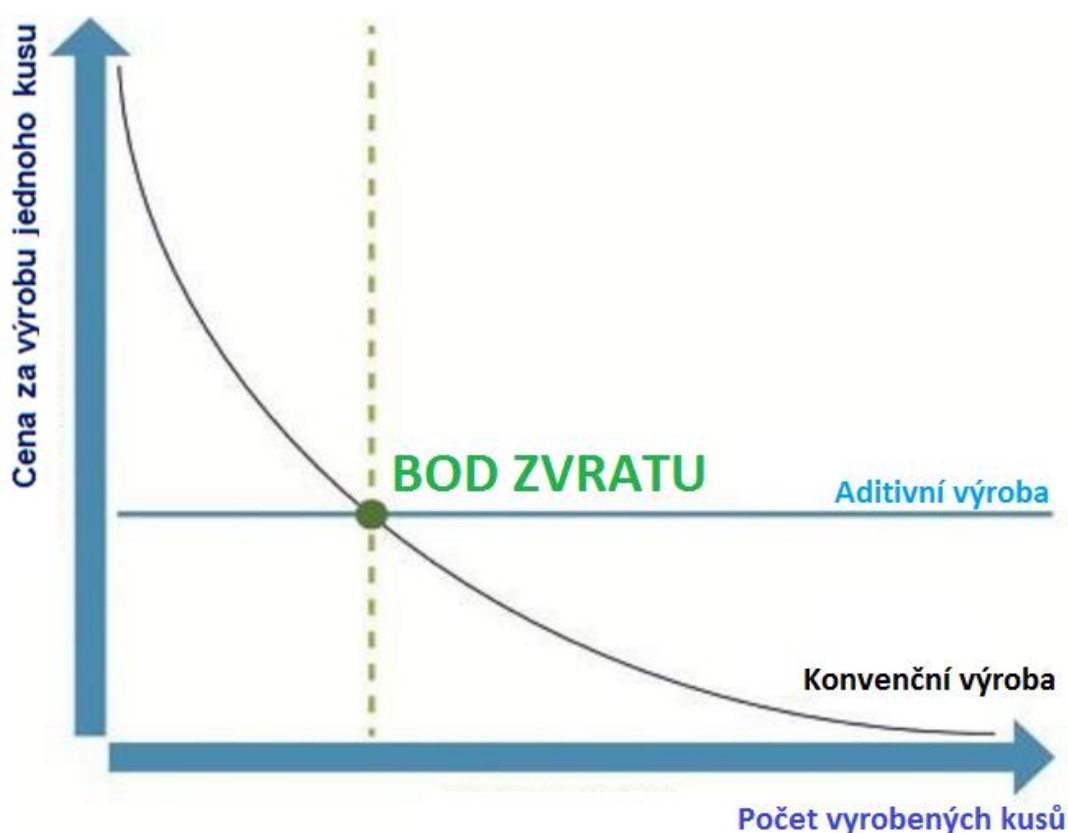
V diplomové práci se autor podrobněji věnuje technologii FDM (FFF), která patří v současnosti mezi nejrozšířenější a nej dostupnější i pro běžné uživatele. Jedná se o tavení plastové struny horkou tryskou a postupné nanášení vrstev na podložku. Přestože jde o 30 let starou technologii, tak k jejímu rozvoji pomohlo až skončení platnosti základních patentů v roce 2003.

3D tisk nachází největší uplatnění u profesionálů a nedá se v nejbližších letech předpokládat masivní rozšíření do každé domácnosti díky nárokům na technické znalosti a dovednosti. Dá se ale předpokládat, že bude jednou stejně běžný, jako je dnes telefon, tiskárna, či kopírka. Není to tak dávno, kdy jsme chodili volat do telefonní budky a kopírovat či tisknout bylo možné pouze v knihovně nebo kopy centru.

Celá řada uzavřených řešení podléhá patentům. Většinou jsou to profesionální, rychlé a spolehlivé 3D tiskárny s velmi intuitivním ovládáním. Naproti tomu stojí projekt open source na němž je založen také princip 3D tiskáren RepRap. Jde o 3D tiskárny, které se dokáží z velké části sebe replikovat. Velkou výhodou je, že každou další tiskárnu je možné inovovat. Proto roste tento projekt exponenciálně díky rychlému tempu vývoje a díky podpoře velkého množství uživatelů.

1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Na rozdíl od pojmu Rapid Prototyping (dále jen RP) a 3D tisk se Aditivní technologie, či výroba (dále jen AM), spojuje hlavně pro označení procesů, při nichž vzniká koncový výrobek [2]. Za AM lze označit výrobu výrobků, které nejsou vyrobeny konvenčním odebráním materiálu, jako je třeba třískové obrábění, ale naopak nanášením jednotlivých tenkých horizontálních vrstev materiálu na sebe. Vstupními daty pro celý proces tisku je virtuální model vytvořený v CAD systému, stažený z databáze na internetu nebo je naskenován s využitím reverzního inženýrství. Model ve formátu STL je následně ve vhodném programu podobném CAM systému nařezán na tenké vrstvy. Tyto vrstvy jsou následně přeneseny do stroje ve formě G-kódu podobnému programům v CNC strojích. Aditivní technologie zahrnují zejména spékání a slinování prášků různého chemického složení, zrnitosti, fyzikálních, chemických i jiných užitečných vlastností. Většina prototypů je funkčních, ale jsou často nevhodné k většímu zatížení. Správnou volbou technologie a materiálů lze dosáhnout kvality dílů, které se blíží vlastnostem finálních výrobků. Velkým přínosem technologie je zkvalitnění navrhovaných výrobků ve velmi krátkém čase a nízkých nákladech. AM je pro rychlou přípravu výroby vhodný zejména pro kusovou a malosériovou výrobu.



Obr. 1 Aditivní výroba je z ekonomického hlediska výhodná pro kusovou a malosériovou výrobu. Konvenční výroba naopak pro sériovou výrobu [6].

Podle báze materiálu se technologie RP člení podle fotopolymerů, práškových materiálů a tuhých materiálů. Podle báze použitého stavebního materiálu se RP člení dle fotopolymerů, práškových materiálů a tuhých materiálů. Nejvýznamnější výrobce 3D tiskáren je firma Stratasys a to i díky velkému množství patentů v této technologii, např. vyhřívané komoře. Mezi další významné výrobce patří Ultimaker, MakerBot, FlashForge, 3D Systems, Stratasys, Zortrax, Printbot, Wanhao, XYZprinting, Kossel, 3D Systems, 3DGence, Cube, Sigma, Omni3D, Formlabs. Nejprodávanější 3D tiskárnou na světě je momentálně Original Prusa MK2 od Josefa Průši [3, 5, 6].

1.1 Popis procesu výroby aditivní technologie

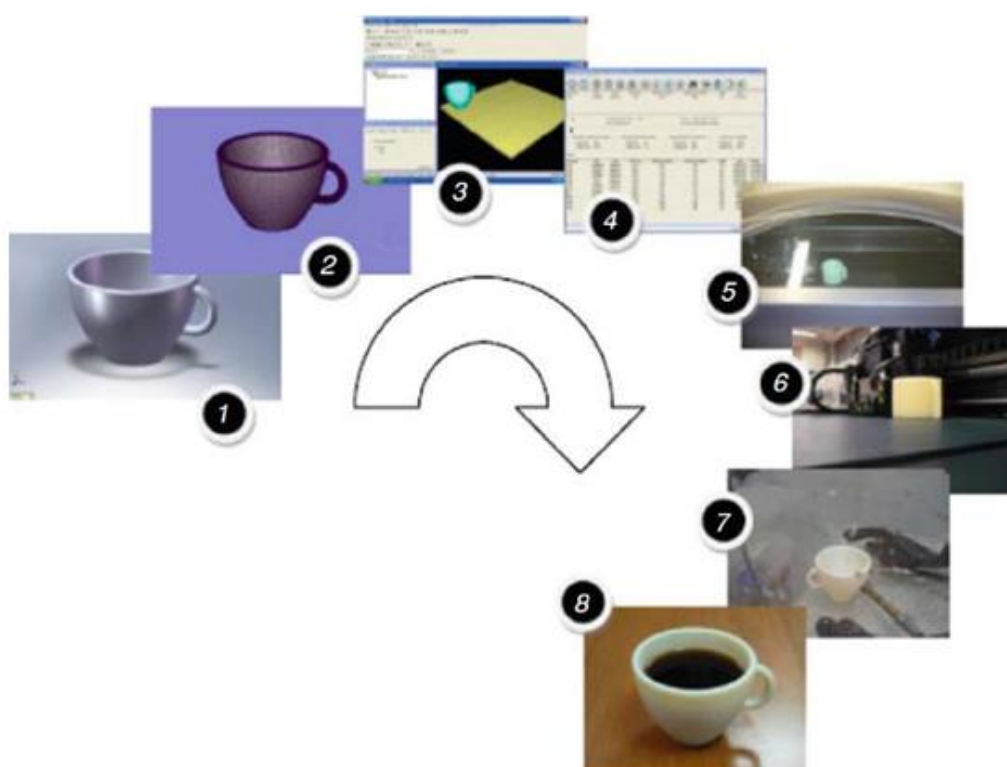
Proces aditivní technologie, jinak řečeno 3D tisku, se skládá ze tří základních částí – preprocessing, processing a posprocessing [8].

- Preprocessing – zahrnuje přípravu dat jako je tvorba CAD dat, uložení do formátu STL a následné vygenerování G-kódu ve vhodném programu.
- Processing – výroba modelu vrstvením konkrétního materiálu, určitým způsobem a závislým na zvolené metodě.
- Posprocessing – je to poslední po výrobní fázi, kdy dochází k vyjmutí modelu a jeho dalšímu opracování.



Obr. 2 CAD data a vliv rozdílné šířky vrstvy na tvar vyrobeného objektu [9].

„Aditivní modelování je proces, který vytváří trojrozměrné objekty tak, že postupně skládá vrstvu po vrstvě určitého materiálu a tím vytváří rozličné finální tvary podle CAD předlohy. Nevzniká tím žádný odpad jako při konvenční výrobě. Tento proces je podobný tisku na inkoustových, nebo laserových tiskárnách (proto tisk) s tím rozdílem, že tiskne prostorové objekty. Objekt vytvořený z vrstev konečné tloušťky je pouze aproximace originálu. Čím tenčí bude použitá tloušťka vrstvy, tím bude tvar vyrobeného objektu blíže k originálu. Všechny komerční přístroje aditivních technologií používají princip vrstvení materiálu. Liší se ve způsobu, jakým jsou vrstvy tvořeny a jak jsou vrstvy vzájemně spojeny. Různé technologie pak generují různé přesnosti vyrobeného objektu, mechanické vlastnosti, cena a jak rychle je výroba provedena. Aditivní modelování (AM) se využívá v široké řadě aplikací, která se neustále rozrůstá. Nejvíce bylo používáno pro tzv. „Rapid Prototyping“ (RP) což je výroba prototypů pomocí 3D tisku. Tyto prototypy jsou většinou nevhodné k většímu zatížení a slouží většinou k představě o vzhledu a zástavbě do stroje či k menšímu zatížení. AM má však širší rámec než je realizace modelů. Termín RP byl dříve používán jako synonymum AM. AM však má možnosti daleko za rámec tvorby prototypů, proto se postupně místo dříve používaného termínu RP používá obecnější termín AM. Proces AM obsahuje řadu kroků od virtuálního CAD modelu k fyzickému objektu.“ [9].



Obr. 3 Proces výroby pomocí AM [9].

1) CAD

Zhotovení modelu pomocí CAD programu.

2) Konverze STL

Uložení CAD souboru do formátu STL, s kterým AM zařízení pracují.

3) Import STL do AM zařízení

Nahrání STL souboru do AM zařízení a jeho případná úprava.

4) Nastavení zařízení AM

Nastavení procesu tisku (teploty tisku, podložky, množství materiálu, rychlosti tisku, výšky vrstvy, ...)

5) Tisk objektu

Automatický proces, který může probíhat bez obsluhy.

6) Odstranění objektu

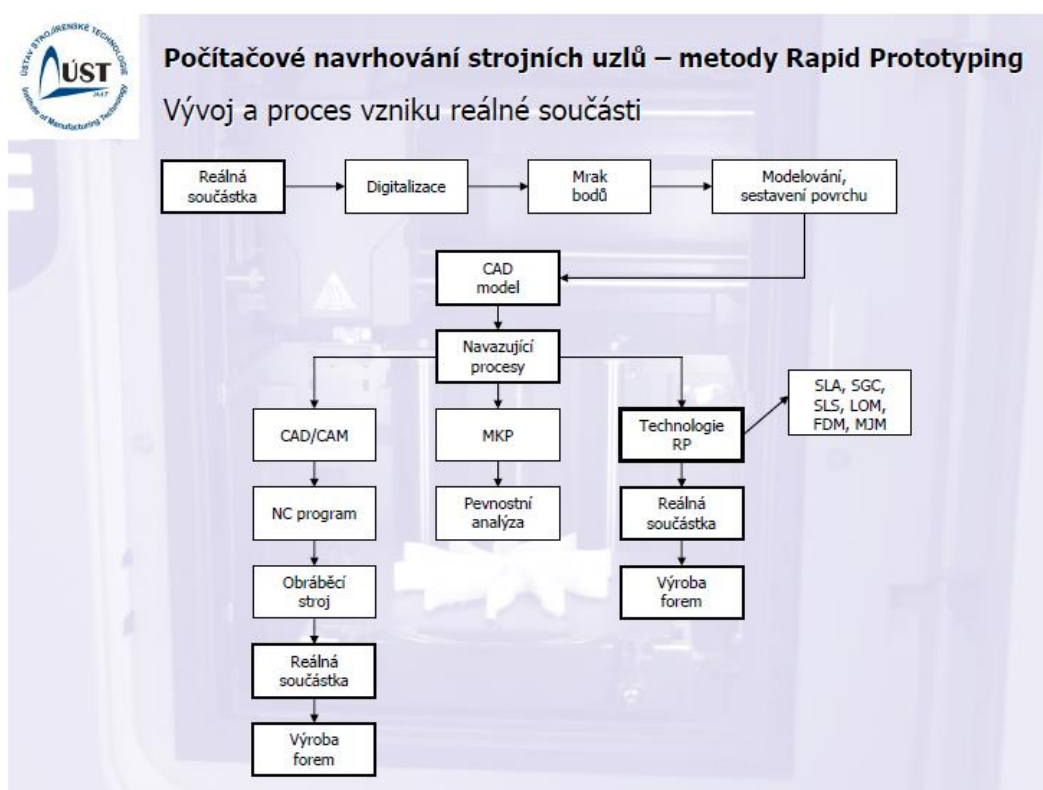
Po dokončení tisku je vytištěný objekt vyndán ze zařízení AM.

7) Postprocessing

Vytisknuté objekt je třeba většinou upravit, odstranit přebytečný materiál nebo odstranit podpory.

8) Využití

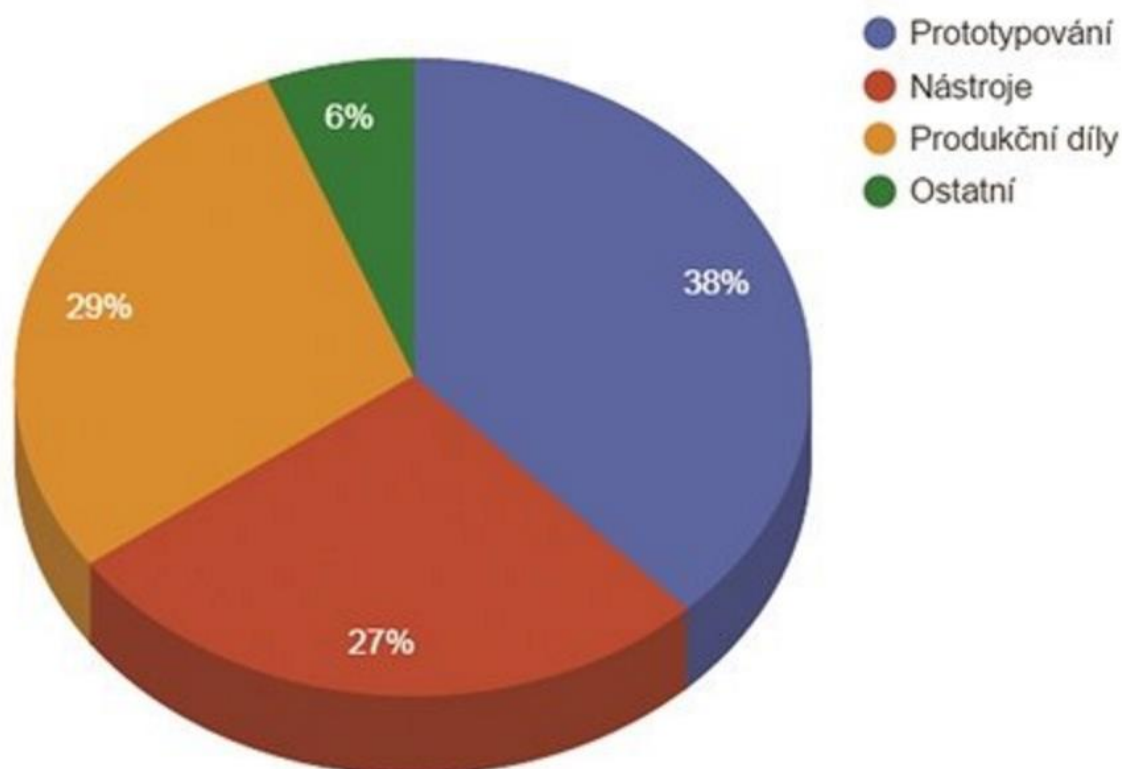
Vytištěný objekt je připravený pro použití.



Obr. 4 Počítačové navrhování strojních uzlů [8].

1.1.1 Současný stav aditivních technologií ve světě

Ve světě dochází k obrovskému rozvoji aditivních technologií v celé řadě oborů. V současnosti se obecně 3D tisk nejvíce uplatňuje ve výrobě prototypů, nástrojů a čím dál častěji také finálních dílů v různorodých odvětvích. Nejvíce rostou prodeje nejlevnějších 3D tiskáren do 500 dolarů. Důvodem nárůstu prodeje těchto zařízení je uplatnění nejen v domácnosti, ale také ve výrobních společnostech a u profesionálů. Do 5 let má trh s levnými 3D tiskárny má dosáhnout objemu 4 miliard dolarů. Poroste značně i prodej materiálů a poptávka po navazujících službách. Profesionální zařízení začínají na ceně okolo čtvrt milionu korun.



Obr. 5 Aktuální využití 3D tisku ve firmách [6].

Původní představou bylo využití 3D tiskárny v každé domácnosti. V současnosti se hlavními uživateli stávají profesionální uživatelé, jako jsou konstruktéři, designéři, projektanti, návrháři, architekti, umělci a zdravotníci. U aditivních technologií tisku z kovového práškového má pak největší využití v kosmickém, leteckém, vojenském, automobilovém a čím dál více také ve zdravotnickém průmyslu.

1.1.2 Využití aditivních technologií

3D tisk začínal jako nástroj pro výrobu rychlých a levných prototypů. S uvolněním řady patentů a příchodem levnějších technologií došlo k lepší finanční dostupnosti a došlo tak i k jeho dalšímu využití. Jedním z nich je například malosériová výroba. Pokud firma plánuje vyrábět sérii produktů, která je příliš malá a má tak vysoké náklady spojené s přípravou výroby, pak je 3D tisk těchto produktů finančně výhodnější. Velkou výhodou této technologie je personalizovaná výroba, kdy může být každý díl přizpůsoben přání zákazníka. Pokud se od zákazníků podaří získat zpětnou vazbu na prototypy a je nutné provádět u produktu změny, tak není nutné znovu investovat do přípravy výroby. Využití AM se nabízí při opravě starožitností a veteránů, kde nejsou náhradní díly dostupné často už desítky let. 3D tisk je mladá technologie, a tak se další využití objevují každý den.

Oblasti největšího využití aditivních technologií:

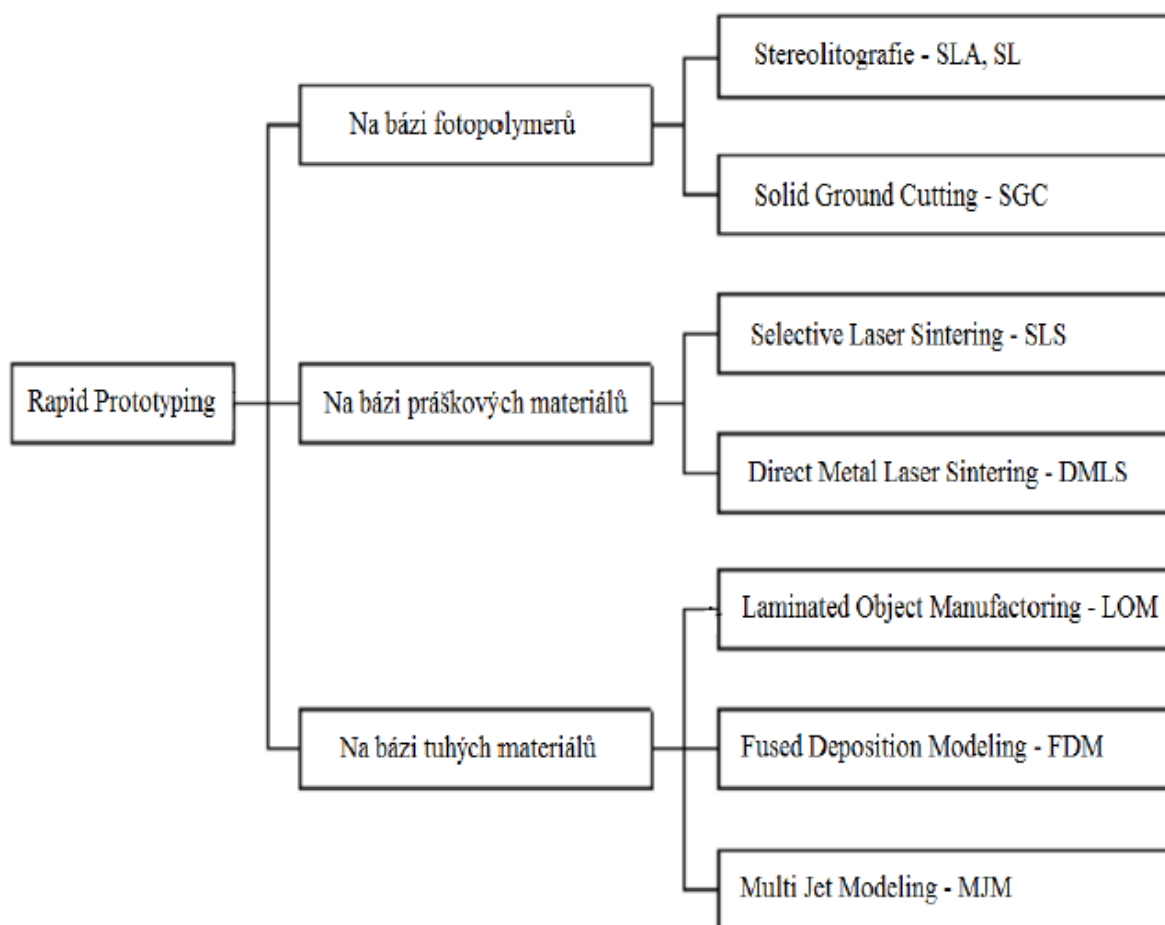
- prototypování,
- strojírenství,
- reverzní inženýrství,
- automobilový průmysl
- zdravotnictví,
- letecký průmysl,
- vojenský průmysl,
- móda a design,
- kosmický výzkum,
- vzdělání,
- architektura.



Obr. 6 Lebka vytištěná aditivní technologií [12].

1.2 Rozdělení aditivních technologií

Aditivních technologií se od sebe odlišují způsobem, jakým jsou vytvářeny jednotlivé vrstvy modelu a použitými materiály. Podle báze materiálu se technologie RP člení podle fotopolymerů, práškových materiálů a tuhých materiálů [7, 11].



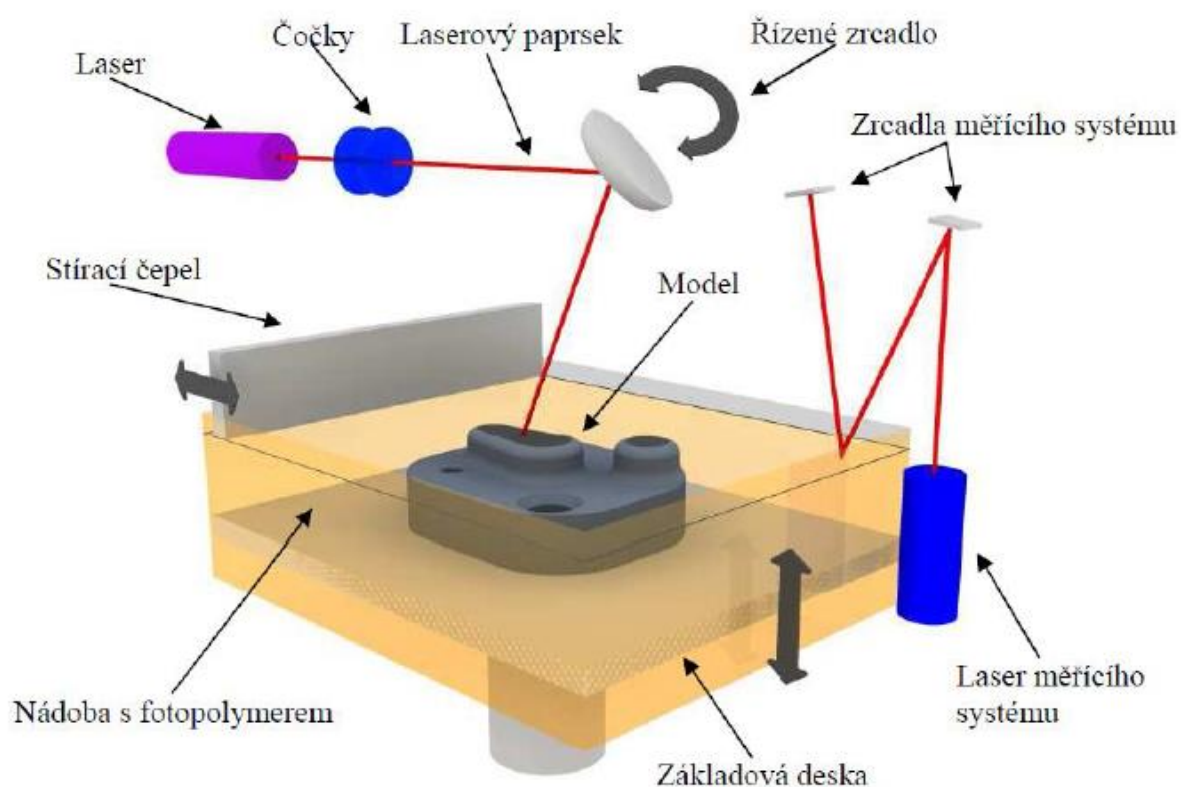
Obr. 7 Rozdělení metod Rapid Prototyping podle báze materiálu [10].

1.2.1 Rapid Prototyping na bázi fotopolymerů

Modely na bázi fotopolymerů jsou většinou stavěny v nádobě s kapalnou pryskyřicí, kdy pod hladinou dochází k postupnému vytvrzení jednotlivých vrstev [7].

- Stereolitografie –SLA

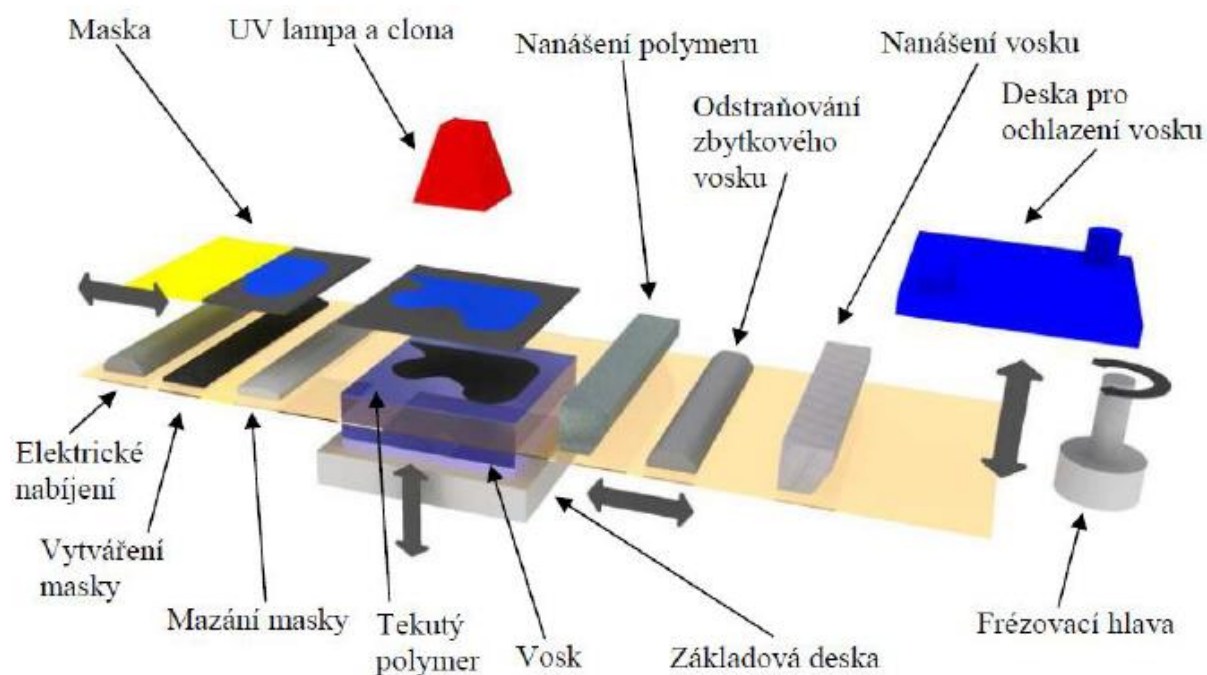
Principem je vytvrzování polymerní pryskyřice pomocí laserového paprsku o vlnové délce v rozsahu UV záření. Nevýhodou je to, že tato metoda potřebuje úpravu povrchu modelu a následné sušení. Nejvyšší přesnost je ve středu tiskové plochy, směrem k okrajům se snižuje. Výhodou je možnost zhotovení objemnějších modelů, dostatečná přesnost i jakost povrchu, široký výběr materiálů, rychlost tisku a není třeba obsluhy během procesu [7].



Obr. 8 Popis technologie SLA [10].

- Solid Ground Cutting – SGC

Šablonová deska projde ionografickým procesem nanášení speciálního toneru. Na nosnou desku je následně nanášena tenká vrstva fotopolymerní pryskyřice. Nad ní je umístěna šablonová deska. Krátkodobým působením UV lampy je vytvrzena. Nevýhodou je velké rozměry zařízení, problém s usazeninami vosku, tvorba odpadu, hlučnost. Výhodou je minimální smrštění modelu, dobrá struktura a stabilita modelu, proces neprodukuje žádný zápach [7].



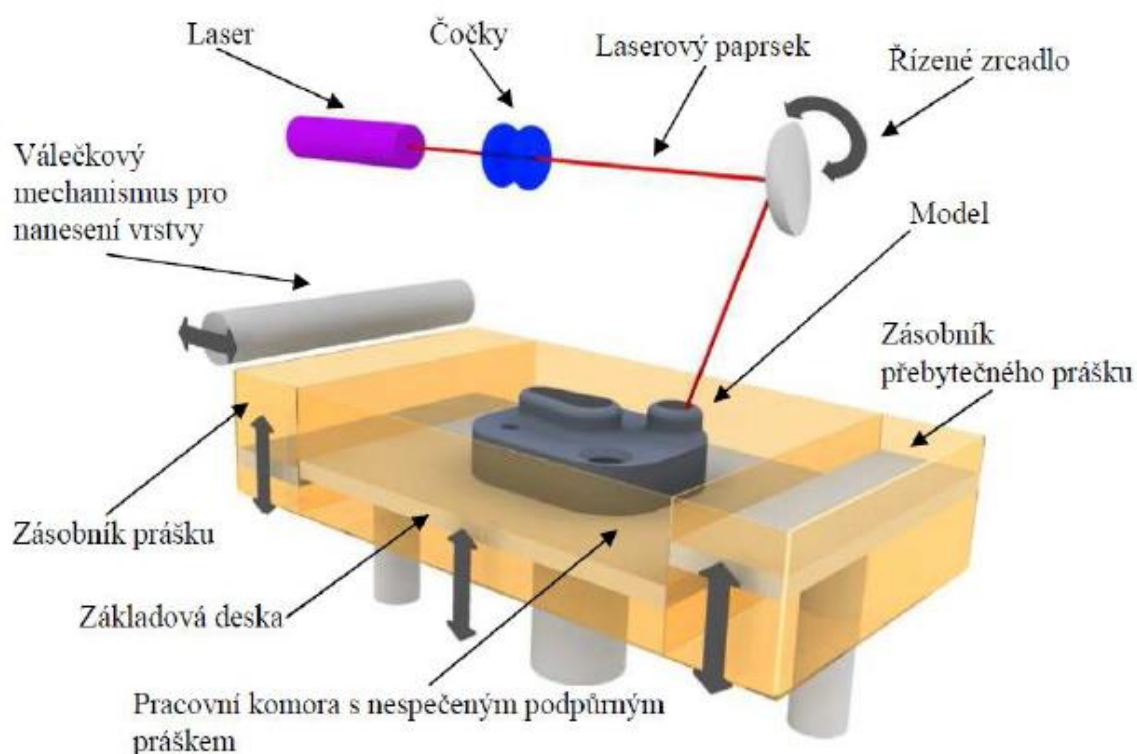
Obr. 9 Popis technologie SGC [10].

1.2.2 Rapid Prototyping na bázi práškových materiálů

Jako výchozí materiál k výrobě modelu se používá jemný prášek. Některé z metod, patřící do této skupiny, jsou podobné metodám řadícím se do skupin kapalných [7].

- Selective Laser Sintering –SLS

První vrstva práškového materiálu je nanesena na podkladovou desku. Působením CO2 laseru je prášek nataven – dochází k jeho spékání pouze v požadovaném místě. Okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpora. K výhodám patří pevnost výrobků a velké množství použitelných materiálů. K nevýhodám patří prostorově a energeticky náročné zatížení. Kvalita povrchu je v porovnání s ostatními metodami nízká [7].



Obr. 10 Popis technologie SLS [10].

Další technologie SLS:

Laser Sintering - Plastic

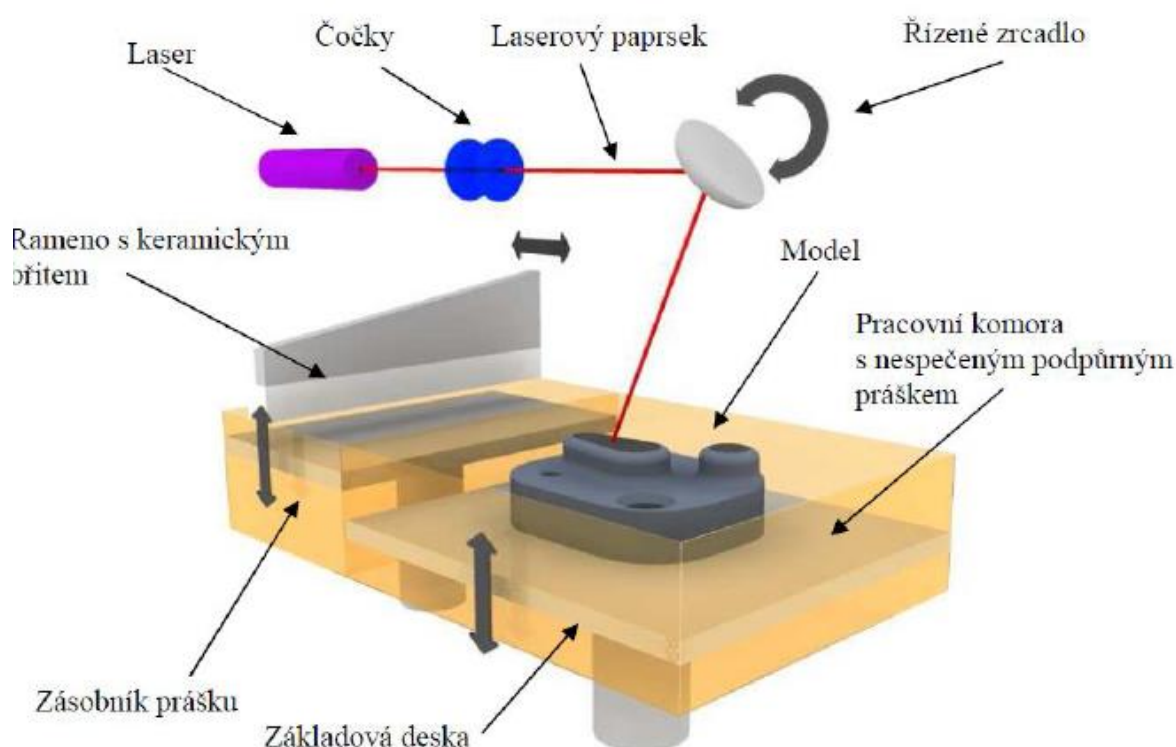
Laser Sintering - Metal

Laser Sintering - Foundry Sand

Laser Sintering – Ceramic (Direct Shelt Production Casting)

- Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Je to technologie rychlé výroby kovových dílů přímo z CAD dat, založený na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. Dávkovací zařízení nastaví množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břitem rozprostře na povrch ocelové platformy rovnoměrnou vrstvu prášku dle zvolené tloušťky vrstvy. V místě dopadu laserového paprsku je kovový prášek lokálně roztaven, přičemž dochází k „protavení“ podkladové vrstvy a následně tuhne do pevného stavu. Ocelová platforma odvádí zároveň teplo, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. Pro většinu materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem a díl je tak chráněn před oxidací [7].



Obr. 11 Popis technologie DMLS [10].

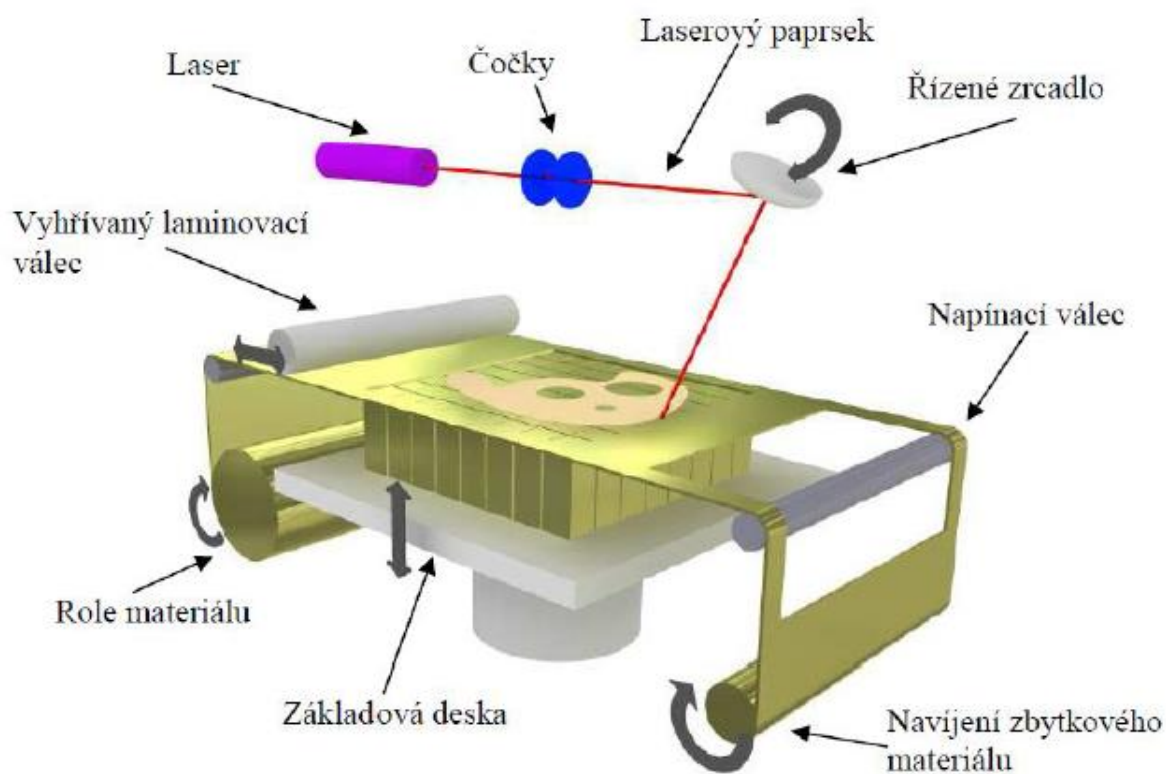
Je to technologie rychlé výroby kovových dílů přímo z CAD dat, založený na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. Dávkovací zařízení nastaví množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břitem rozprostře na povrch ocelové platformy rovnoměrnou vrstvu prášku dle zvolené tloušťky vrstvy. V místě dopadu laserového paprsku je kovový prášek lokálně roztaven, přičemž dochází k „protavení“ podkladové vrstvy a následně tuhne do pevného stavu. Ocelová platforma odvádí zároveň teplo, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. Pro většinu materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem a díl je tak chráněn před oxidací [7].

1.2.3 Rapid Prototyping tuhých materiálů

Výhoda prototypových součástí je velmi odlišná od výroby prototypů na principu kapalné báze. Společným znakem této skupiny je počáteční volba materiálu v tuhé fázi (pro danou metodu výroby) k vytvoření prototypové součásti [7].

- Laminated Object Manufacturing – LOM

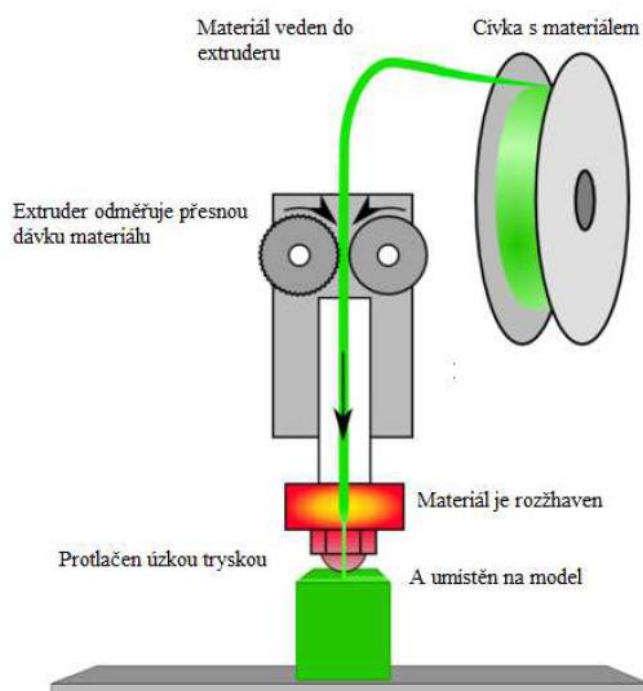
Principem technologie je lepení jednotlivých vrstev papíru nebo plastu k sobě lepidlem. Laser následně vyřezá kontura modelu. Metoda není vhodná pro modely s tenkou stěnou. Výhodou je nízká cena. Pevnost modelu je omezena, proto se využívá převážně pro design [7].



Obr. 12 Popis technologie LOM [10].

- Fused Deposition Modeling –FDM

Tato metoda je v dnešní době nejrozšířenější a také nejvíc dostupná. Princip metody spočívá v natavování termoplastického materiálu navinutého ve formě drátu na cívce, ze které je vtlačován do vyhřívané trysky pomocí kladek. Následně je nanášen po jednotlivých vrstvách na vyhřívanou podložku. Je to výroba funkčních prototypů, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. Při výrobě vzniká minimální odpad, pouze materiál podpor. Nevýhodou je omezená přesnost daná tvarem materiálu a průměrem výstupní trysky. Z důvodu principu metody a vlastností materiálu nejde proces výroby urychlit [7].



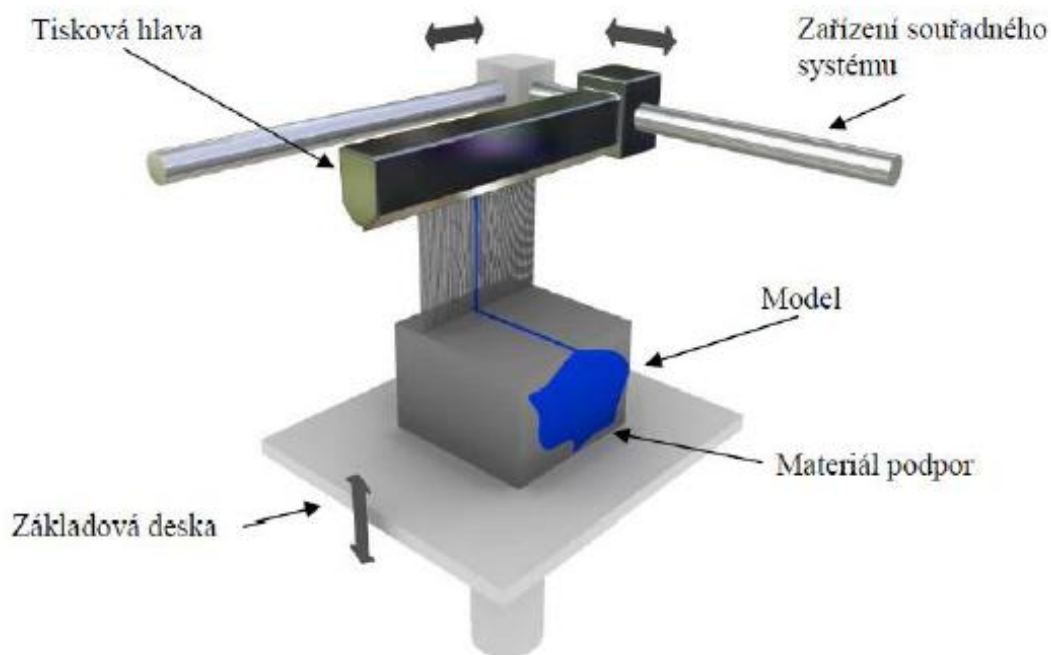
Obr. 13 Popisná technologie FDM [13].



Obr. 14 Autíčko zhotovené pomocí technologie FDM [12].

- Multi Jet Modeling – MJM

Principem technologie je postupné nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru pomocí speciální tiskové hlavy. Jde o jednoduché řešení, ekonomickou výrobu modelů, která je časově výhodná. Nevýhodou je výroba menších součástí, omezená volba materiálu a malá přesnost [7].



Obr. 15 Popisná technologie MJM [10].

- Arburg Plastic Freeforming – APF

Je to technologie firmy Arburg. Jedná se o malosériovou výrobu 3D tiskem z plastového granulátu. Stroj FreeFormer umožňuje tisknout dvoubarevné, i dvoukomponentní dílce, kombinací například tvrdého a měkkého plastu. Díky této možnosti kombinovat různé materiály s různými vlastnostmi dokáže zařízení produkovat funkční díly. Výhodou této technologie je kromě nižší ceny stavebního materiálu také fakt, že tisk probíhá bez nutnosti použití podpory. Dochází tak k velkému snížení času postprocesingových operací. Celý výrobní proces je bezodpadový, protože se vyrábí z konečného materiálu. Výrobek má až 95 % mechanických vlastností ve srovnání s vstřikovaným dílcem [7].

1.2.4 Další technologie Rapid Prototyping

- Ballistic Particle Manufacturing – BPM
- Multiphase Jet Solidification – MJS
- Direct Shell Production Casting – DSPC
- Direct Laser Forming – DLF

1.3 Legislativa aditivních technologií

Aditivní výrobu popisuje norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology) [25].

Norma je rozdělená do 7 výrobních procesů:

- Vytlačování materiálu (Material Extrusion) - materiál je selektivně vytlačován přes tryšku. Metoda používaná hlavně pro tisk termoplastů.
- Nanášení tryskáním (Material Jetting) - kapičky materiálu jsou selektivně ukládány. Lze tisknout polymery a vosky.
- Tryskání pojiva (Binder Jetting) - vrstvu po vrstvě je nanášené tekuté pojivo za účelem spojení práškových materiálů. Lze tisknout kovy, písek a keramiku.
- Laminace plátů (Sheet Lamination) - konečný model vytvářejí pláty materiálu, kterou jsou spojovány v celek.
- Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization) - vrstvu po vrstvě je fotopolymerní kapalina v nádobě vytvrzována polymeračním světlem. Pryskyřice je slouží jako materiál k vytvrzování.
- Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion) - tepelná energie laserového nebo elektronového paprsek spéká práškový kov vrstvu po vrstvě. Lze tavit oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, i exotické materiály.
- Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition) - soustředěnou tepelnou energií je materiál nataven i při změně polohy.

2 CHARAKTERISTIKA 3D TISKARNY TYPU REP RAP

Název RepRap je zkratkou z Replicating Rapid Prototyper. Znamená to schopnost sebereplikace a rychlého prototypování. Tento projekt založil Adrian Boywer na University of Bath se svými studenty. Vize projektu je levná distribuce RepRap zařízení komukoliv a kamkoliv. První předchůdci RepRapu vychází se stavebnice Merkur. Podstatou RepRapu je otevřený hardware. Díky otevřenosti projektu a nízké ceně je RepRap celosvětově velmi rozšířený. Konstrukce RepRap se skládá z řady součástí. Z větší části to jsou plastové díly, vytisknuté většinou na jiné RepRap 3D tiskárně. Tyto plastové díly tvoří podstatnou část konstrukce. RepRap obsahuje také tiskovou hlavu s tryskou, vyhřívanou desku, krokové motory, kovové tyče, šrouby, ložiska, řemeny a jednodeskový počítač. Od tohoto projektu je odvozena většina cenově dostupných řešení 3D tiskáren.

2.1 Historie RepRap

- 2005
První 3D tiskárna Meccano, kterou postavil Vik Olliver ze stavebnice Merkur
- 2005
Založení projektu RepRap Dr. Adrianem Bowyerem na University of Bath
- 2007
RepRap 1.0 – první tiskárna Darwin
- 2009
RepRap 2.0 – tiskárna Mendel, kterou postavil Ed Sells
- 2010
RepRap 3.0 – tiskárna Huxley, kterou postavil Erik de Bruijn
- 2010
První prototyp RepRap 3D tiskárny Josefa Průši
- 2013
RepRap 3D tiskárna Rebel I. Od Daniela Lence

2.2 Open source řešení

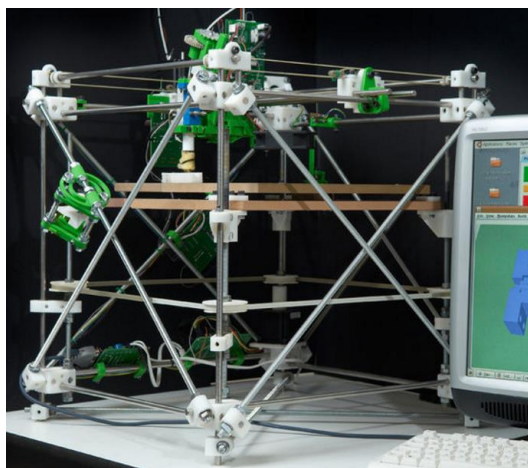
Open source lze přeložit jako volný přístup. Jde o způsob vývoje a distribuce. Open Source řešení mají k tiskárně dostupnou dokumentaci včetně návodu, jak ji celou sestavit a plánu všech použitých dílů. Náhradní díly jsou dostupné často od více výrobců a je tedy možnost individuální volby. Kompletní dokumentace potřebná pro sestavení hardwaru a k provoz 3D tiskáren typu RepRap, včetně firmware a řídicího software, je uvolněna pod licencí GNU General Public Licence.

2.3 Základní větve Rep Rap

Existuje několik základních větví projektu RepRap. U nás jsou nejznámější a nejrozšířenější Rebel a Prusa.

- **Darwin**

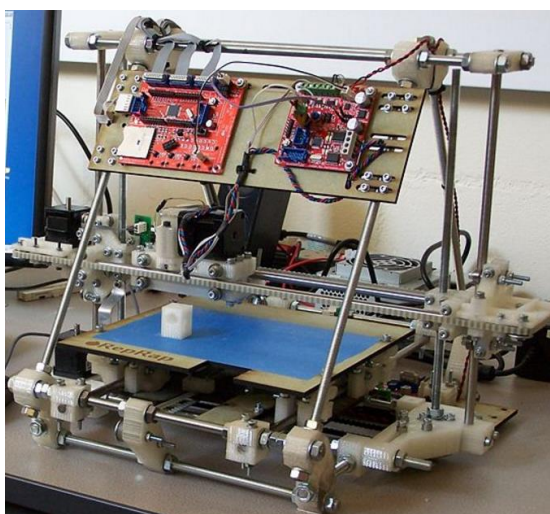
Historicky je to úplně první model zrozený v rámci RepRap projektu. Skládá se z velkého množství součástek.



Obr. 16 Tiskárna Darwin [14].

- **Mendel**

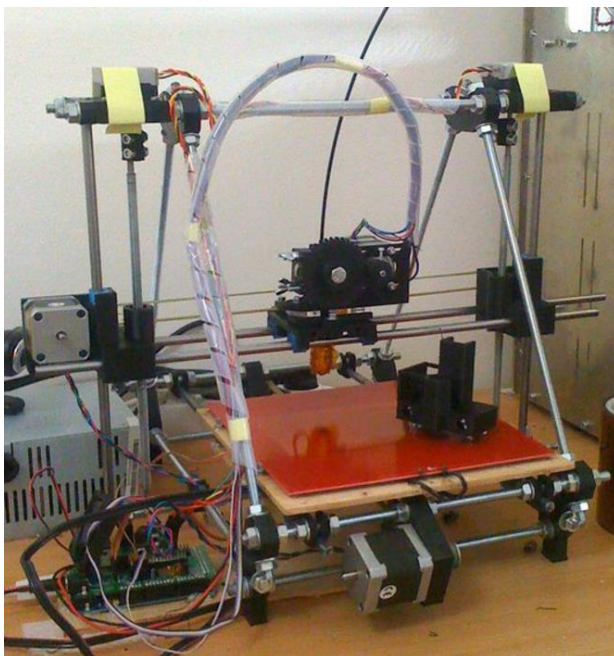
Tato tiskárna patří do druhé generace RepRap tiskáren. Základní princip je podobný s Darwinem. Tiskárna je ale jednodušší, zpevněná, má zmenšené rozměry a i její funkčnost a spolehlivost je v porovnání s předchozím modelem větší.



Obr. 17 Tiskárna Mendel [14].

- **Prusa** (nebo Mendel-Prusa)

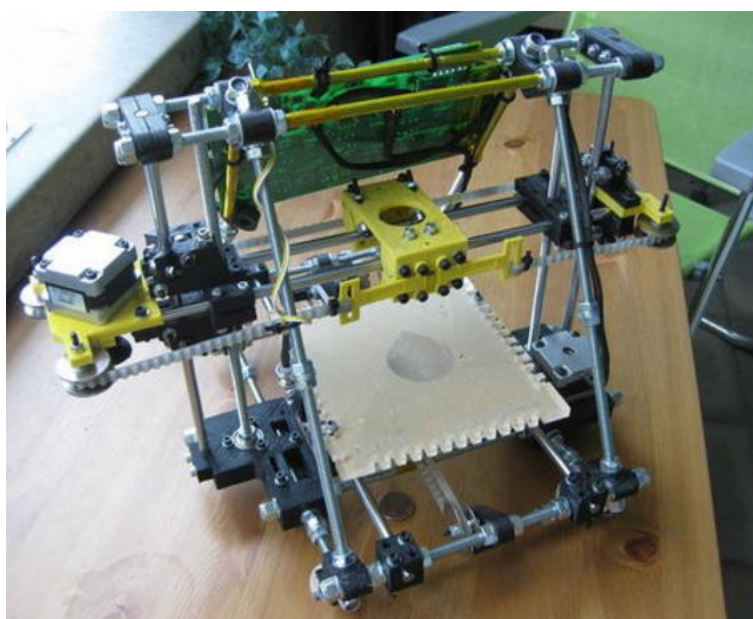
Dosahuje stejné funkčnosti jako Mendel, vychází z něj, ale je výrazně jednodušší a levnější.



Obr. 18 Tiskárna Prusa [14].

- **Huxley**

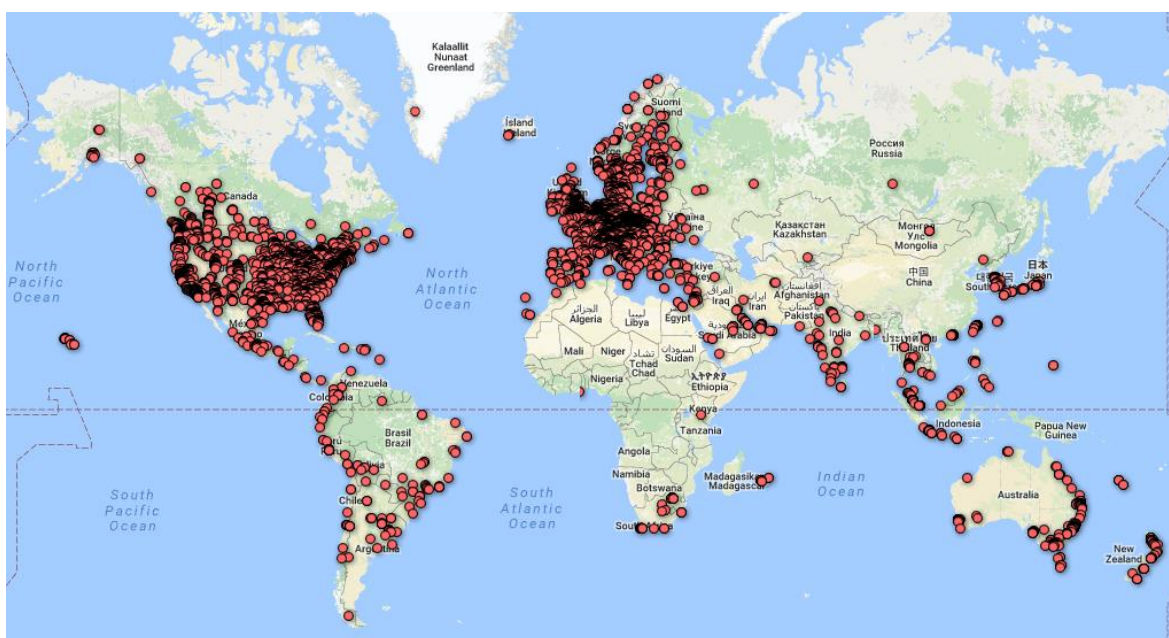
Je čtvrtou vývojovou větví RepRap tiskáren. Vychází z Mendela a je vhodný pro pokročilejšího stavitele RepRap tiskáren, které zajímá miniaturizace.



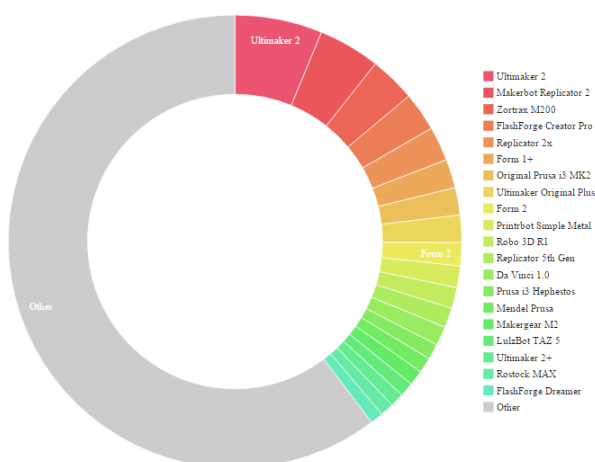
Obr. 19 Tiskárna Huxley [14].

2.4 Original Prusa

Josef Průša, zakladatel firmy Prusa Research a významný propagátor RepRap 3D tiskáren u nás i ve světě, se 3D tisku věnuje od roku 2009. První tiskárnu zprovoznil už v roce 2010. O pár let později zkonstruoval model i3, který je dodnes nejkopírovanějším modelem RepRap tiskárny na světě. V roce 2016 přišel na trh s novým modelem označeným jako Original Prusa i3 MK2 a už tehdy dodával přes 500 těchto 3D tiskáren do celého světa. Tento model se stal následně vítězem testu 3D tiskáren nezávislého časopisu Make. Po zveřejnění výsledků vzrostly firmě objednávky o 50 %. Na konci roku 2016 vyráběl více než 2000 3D tiskáren. V současnosti je to přes 5000 dodaných 3D tiskáren měsíčně do více než 90 zemí světa. Čekací lhůta na dodání tiskáren nebo i jen samotných komponentů je nyní kolem 2 měsíců a poptávka převyšuje výrazně výrobní kapacity firmy [12, 28].



Obr. 20 Rozšíření tiskáren Original Prusa po světě [12].



Note: Prusa i3 and RepRap have been excluded from this list as they refer to multiple printers and not one specific printer model.

Obr. 21 Aktuální prodejnost 3D tiskáren ve světě [12].

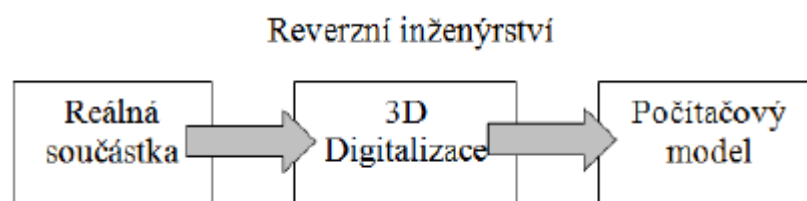
2.5 Vstupní data pro 3D tisk

Standardní formát pro modely určené pro 3D tisku je formát STL. Většina CAD softwaru tento formát podporuje. Při modelování je třeba dávat pozor, aby geometrie modelu byla uzavřená. Dalším zdrojem dat jsou volně dostupné modely z databází na internetu a modely získané pomocí 3D skenování, takzvaného reverzního inženýrství.

2.5.1 Software pro 3D modelování

Na trhu jsou k dispozici CAD software placené a neplacené. Mezi profesionální placené CAD software patří SolidWorks, Inventor, Caxa, Creo, Rhinoceros a další. Mezi neplacené CAD software patří například Autodesk 123D Design, OpenSCAD nebo Fusion 360.

2.5.2 Reverzní inženýrství



Obr. 22 Proces získávání dat 3D modelu z reálné součástky [10].

2.5.3 Databáze 3D modelů

- Thingiverse
- Grabcad
- Sketchfab
- Autodesk 123d
- CGTrander
- Exchange 3D
- Artist-3D
- Pinshape
- Cult3D
- 3D export
- Sketchfab
- MakePrintable

2.6 Nejvíce používané materiály pro FDM tisk

Nejčastěji používaným materiálem pro tisk 3D objektů technologií FDM je mechanicky odolný ABS a biologicky odbouratelné PLA.



Obr. 23 Ukázka materiálů pro 3D tisk [12].

- ABS – ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE

„ABS plast je nejpoužívanějších materiálů v 3D tisku. Má dobrou tepelnou odolnost a je relativně levný. Jedná se o velmi stálý plast s vysokou pevností. ABS je schopen odolávat teplotám až do 100 °C bez velkých ztrát na pevnosti, jeho tisková teplota se pohybuje kolem 250 °C. Velká nevýhoda je jeho tepelná roztažnost, v porovnání s ostatními používanými je na tom nejhůře. To při tisku způsobuje deformaci objektů, a vyžaduje proto vyhřívanou podložku. I tak se však nedají vždy spolehlivě tisknout objekty větší než 15 cm. Větší objekty lze tisknout v prostředí bez vlivu proudění vzduchu v uzavřených a vyhřívaných boxech“ [11].

- PLA – POLYLACTIC ACID

„Materiál PLA je vyroben z kukuřičného škrobu a je tak biologicky odbouratelný v řádu jednotek měsíců. V oblasti 3D tisku je tento materiál velmi rozšířen, hlavně kvůli jeho velmi nízké teplotní roztažnosti, která je tak nízká, že ve většině případů není potřeba vyhřívaná podložka. Z běžných materiálů se nejvíce hodí k tisku objektů přes 20 cm. Nevýhodou PLA je v porovnání s ABS, v jeho křehkosti. Výtisky jsou použitelné maximálně do 60 °C. Poté začíná být materiál plastický. Vytisknutý díl se po působení slunce časem samovolně zdeformuje. Tiskové teploty se pohybují kolem 200 °C“ [11].

- PET – POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

„Stejný materiál, ze kterého si každý den naléváte své oblíbené pití. V poslední době si získává velkou oblibu, a to zvláště pro jeho pevnost, stálost a nízkou tepelnou roztažnost. Bere si tak všechny dobré vlastnosti z ABS a PLA, a ty negativní jim nechává. Tepelná roztažnost je velmi malá, a to natolik, že opět pro drtivou většinu objektu není třeba vyhřívané podložky. Výtisky z tohoto materiálu lehce odolají i teplotě vyšší než 100 °C, přičemž teploty tisku se pohybují, podobně jako u ABS, kolem 250 °C. Bohužel zatím je většinou dostupný jen v čiré variantě a cenově zhruba o třetinu dražší než ABS“ [11].

- HIPS – POLYSTYREN

„Nechá se použít jako druhý podpurný materiál pro složité objekty. Rozpouští se v lemonenu“ [11].

- LAYWOOD

„PLA s příměsí dřeva. Výsledný tisk pak nevypadá tak plastově, ale často zasekává trysky. Teplota a rychlost tisku ovlivňuje výslednou barvu“ [11].

- PVA – POLYVINYLALKOHOL

„Jedná se o suchou podobu lepidla na dřevo. Testoval se kvůli rozpustnosti ve vodě pro potřeby jako podpurný materiál. Je extrémně hygroskopický a neosvědčil se“ [11].

- PA6 – POLYAMID (NYLON)

„Houževnatý a flexibilní materiál, který ale není příliš používán, jelikož vyžaduje větší teploty a ne všechny trysky jej zvládnou. Potřebuje také jiný povrch podložky pro tisk, např. sklotextit“ [11].



Obr. 24 Ukázka použití výtisku z materiálu Laywood [12].

2.7 Dokončovací operace

Modely vyrobené s využitím metod Rapid Prototyping lze po dotisknutí dále brousit, tmelit, obrábět, leštit, napouštět speciálními infiltranty. Účelem dokončovacích operací je dosažení lepšího povrchu, lepší přesnosti, snadnější smontovatelnosti nebo dosažení větší ostroty barev. Například při tisku z ABS lze hotové díly vložit do nádoby s acetonem. Díky jeho účinkům se díl krásně vyhladí a nejsou vidět ani jednotlivé vrstvy po tisku. Součástky se také barví, lakují a někdy i galvanicky pokovují. Tyto operace pak mohou stát i více než polovinu ceny vytištěného dílu. Dokončovací operace patří do Post Processingu.



Obr. 25 Na levém díle je vidět účinek acetonu na díle vyrobeného z ABS [20].



Obr. 26 Na pravé straně je ukázka obarveného výtisku [12].

2.8 Základní výpočtové vztahy pro stanovení nákladu na tisk

Náklady na tisk se skládají z ceny 1 cm³ materiálu a ceny tisku za 1 hodinu a lze je vypočítat pomocí následujících vzorečků [28]:

$$C_{3D} = C_{MAT} + C_E + C_O \quad (1)$$

Kde:

C_{3D} – celková cena 3D tisku [Kč]

C_{MAT} – cena materiálu na vytištění modelu [Kč]

C_E – cena za energie [Kč]

C_O – náklady na obsluhu 3D tiskárny [Kč]

$$C_E = T_T + E \quad (2)$$

Kde:

C_E – cena za energie [Kč]

T_T – doba tisku [hod]

E – náklady na energie za hodinu tisku [Kč]

$$C_O = T_T \times C_H \quad (3)$$

Kde:

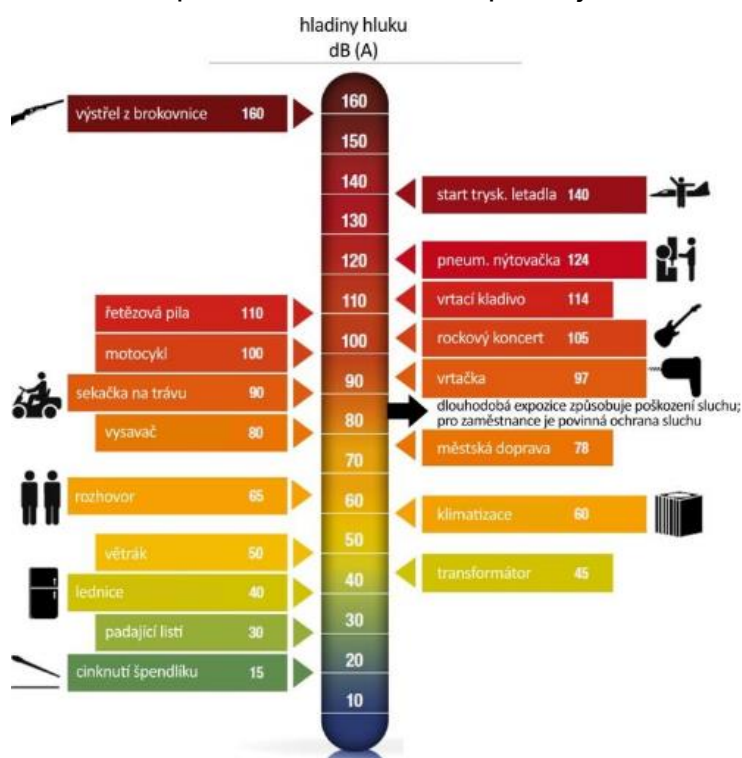
C_T – náklady na obsluhu 3D tiskárny [Kč]

T_T – doba tisku [hod]

C_H – hodinová mzda obsluhy 3D tiskárny [Kč]

3 EXPERIMENT ČÁST – VYUŽITÍ 3D TISKÁRNY V PRAXI

V této kapitole je popsáno stávající řešení, jeho demontáž a postup sestavení inovovaného řešení 3D tiskárny typu RepRap. V další části jsou popsány testované modely a to včetně prototypů, které jsou vyráběny průmyslově pomocí vstřikovacích forem. Následuje porovnání stávajícího a inovovaného řešení. Kapitola je zakončena návrhy na další inovace, které by nově postavenou tiskárnu ještě více přiblížily k profesionálním řešením. Z důvodu hlučnosti stávající 3D tiskárny byl kladen zvýšený důraz na měření hluku a na realizaci řešení, které umožní bezproblémový tisk v domácnosti i v kanceláři ve firmě. Hlučnost byla měřena pomocí aplikace Sound Meter v mobilním telefonu. Aplikace byla před měřením kalibrována podle certifikovaného přístroje.



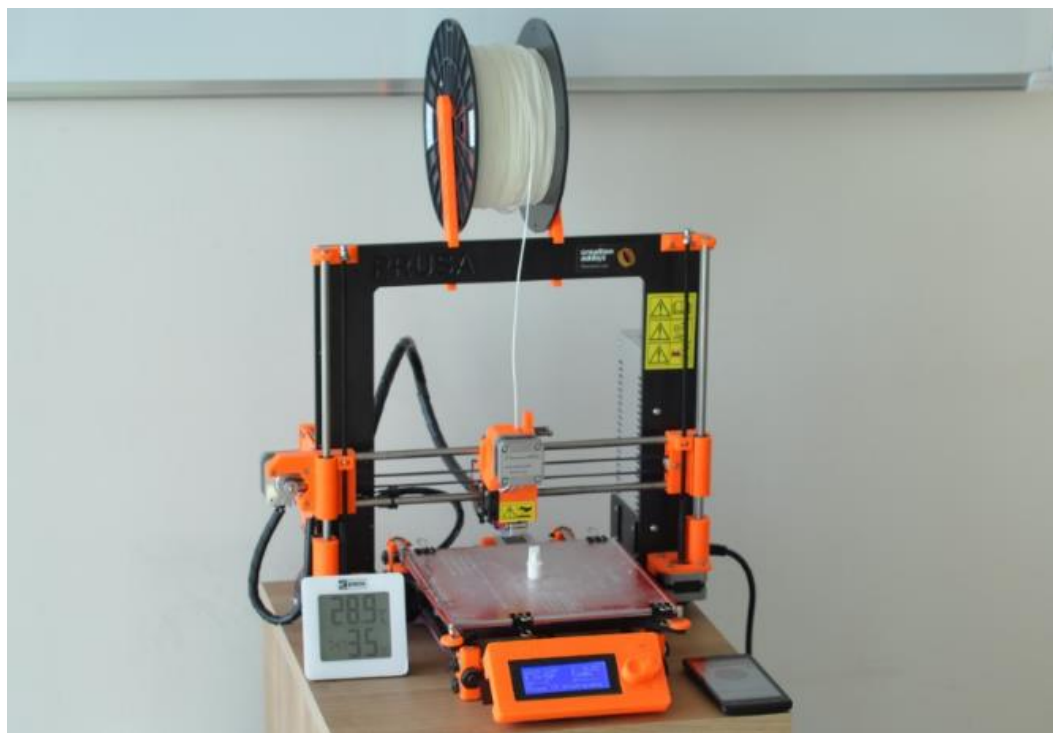
Obr. 27 Stupnice hluku [27].



Obr. 28 Přístroj CEM DT-61 použitý ke kalibraci aplikace k měření hluku v mobilním telefonu.

3.1 Původní řešení 3D tiskárny typu RepRap

Začátkem roku 2016 byla zakoupena 3D tiskárna Original Prusa I3 Plus MK1. Byla pořízena jako stavebnice určená pro nadšence 3D tisku. Jde o jednu z nejrozšířenějších a nejvíce kopírovaných 3D tiskáren typu RepRAP na světě. Její sestavení probíhalo postupně s pomocí přiloženého návodu.



Obr. 29 Původní 3D tiskárna Original Prusa I3 Plus MK1.

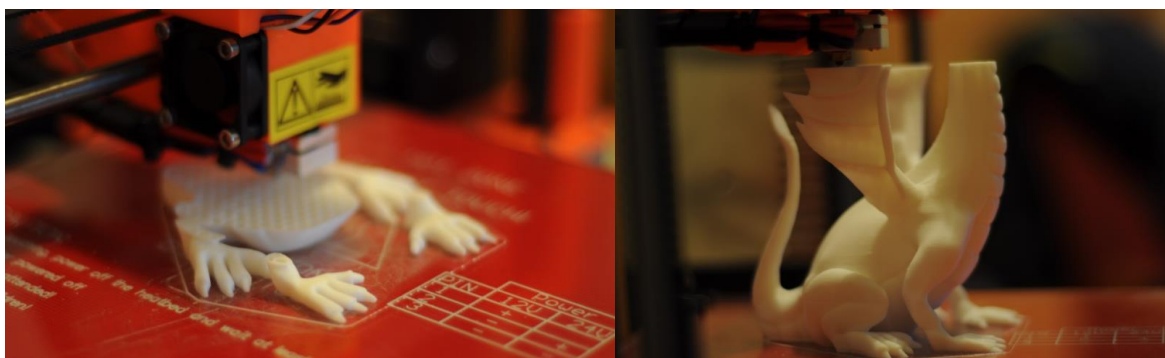
První pokusy o tisk nebyly příliš úspěšné, o čemž svědčí Obr. 30. Přesto se časem podařilo tiskárnu seřídit a proces tisku odladit.



Obr. 30 Neúspěšný tisk převodovky.

Parametry Original Prusa I3 Plus MK1:

- pracovní plocha – 20 x 20 x 20 cm (8000 cm³),
- maximální rychlost 200 mm/s,
- integrovaný LCD, tisk z SD karty (8 GB v balení) nebo z počítače přes USB,
- tryska E3D V6 Lite,
- velikost trysky 0,4 mm pro 1,75 mm tiskovou strunu,
- výška vrstvy od 0,05 mm do 0,25 mm,
- maximální rychlost tisku 200 mm/s,
- manuální kalibrace tiskové plochy,
- vyhřívaná podložka, tisk na sklo,
- podporované materiály – PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Flex, Laywood, Laybrick, Nylon, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, Carbon a další,
- průměrná spotřeba 50 W (tisk PLA) nebo 90 W (tisk ABS),
- elektronika RAMBo,
- rám je vyfrézovaný z duralu a práškově lakován vysoce odolným lakem,
- vnější rozměry 42x42x38 cm,
- váha 6,5 kg,
- CE certifikace,
- cena stavebnice - není již v prodeji, podpora přes fórum, bez školení,
- cena sestavené 3D tiskárny – není již v prodeji.



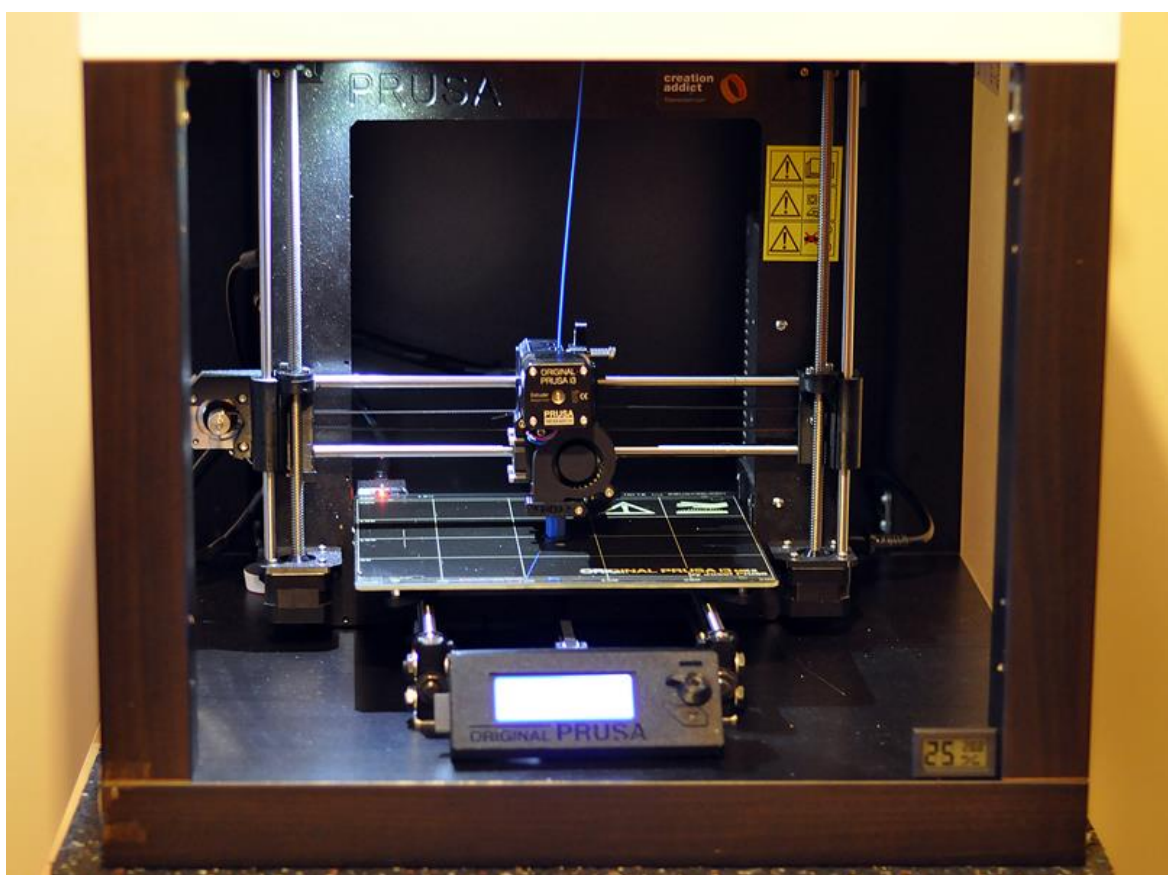
Obr. 31 Ukázka tisku draka na původní 3D tiskárně.



Obr. 32 Drak vytisknutý na původní 3D tiskárně.

3.2 Inovované řešení 3D tiskárny typu RepRap

Inovaci předcházela kompletní demontáž 3D tiskárny Original Prusa i3 Plus MK1. S využitím zakoupeného kitu Prusa Original MK2 a MK2S byla 3D tiskárna dle návodu krok po kroku znovu sestavena. Montáž nové tiskárny trvala 2 dny. Již samotný upgrade z MK1 na MK2S znamenal výrazné zlepšení všech nedokonalostí předchozí verze. Pro zpříjemnění obsluhy během tisku byl k tiskárně připojen notebook s kamerou a pomocí sdílené obrazovky programem TeamViewer a totožné aplikace v mobilním telefonu bylo možné tisk kontrolovat a ovládat na dálku bez nutnosti přítomnosti u tiskárny. Pro snížení vibrací a hluku byla pořízená gumová podložka a postaven jednoduchý uzavřený box, který navíc stabilizoval prostředí během tisku a bylo tak možné dosáhnout lepší kvality tisku.



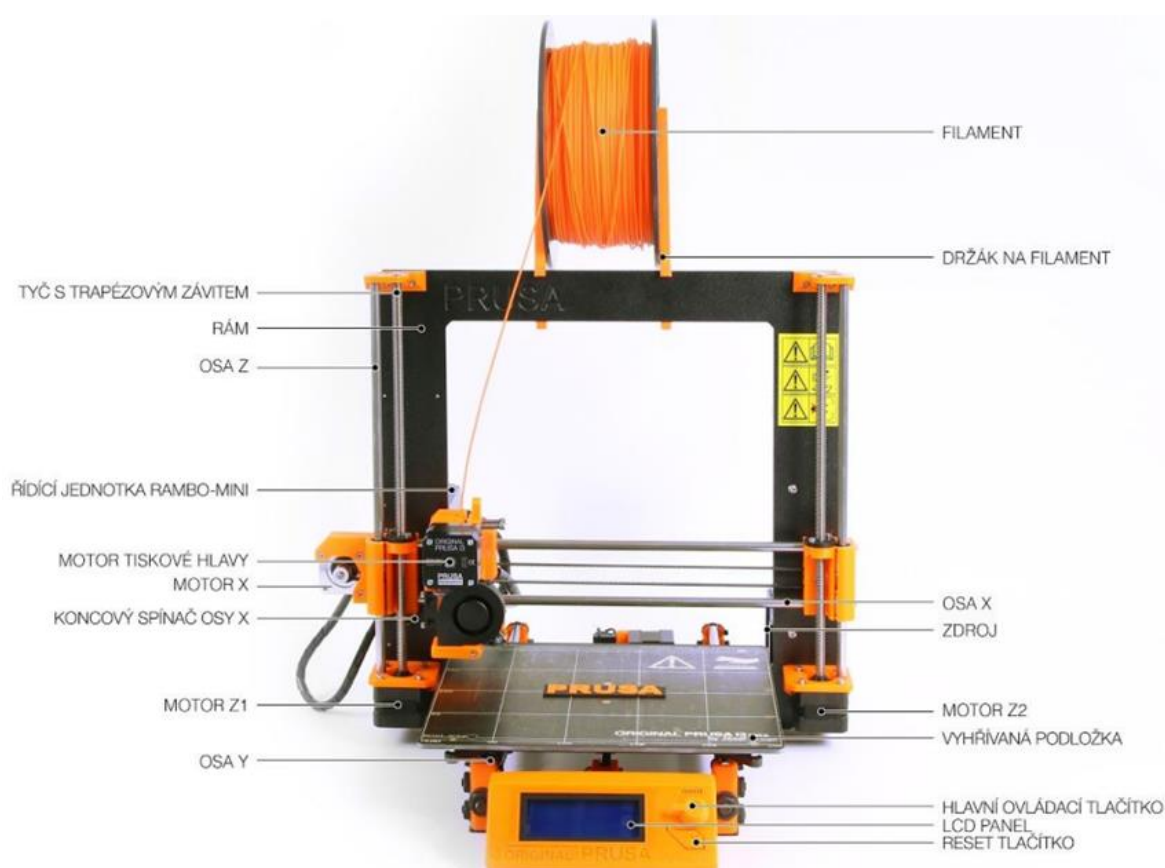
Obr. 33 Inovované řešení 3D tiskárny typu RepRap s odklopeným čelním krytem.

Inovované řešení zahrnovalo:

- přestavbu na Original Prusa MK2S v černé barvě,
- využití kamery v notebooku, mobilního telefonu a programu TeamViewer,
- sestavení uzavíratelného boxu osazeného elektronikou a filtry,
- využití gumové podložky,
- přeinstalování programu Slic3r na nejnovější verzi.

3.2.1 Original Prusa MK2S

Tato nejnovější verze 3D tiskárny Original Prusa se začala prodávat teprve v březnu 2017. Z důvodu obrovského zájmu o ní je čekací doba na dodání kitu na přestavbu, stavebnice i sestavené tiskárny, přibližně 2 měsíce. Již předchozí verze MK2 se stala nejprodávanější na světě. Nyní je nejprodávanější právě verze MK2S. Svými schopnostmi konkuruje uzavřeným řešením a dokonce i některým profesionálním tiskárnám. Dle serveru 3DHUBS.COM se stala MK2 celosvětovým vítězem v kategorii celkový vítěz, nejlepší poměr cena/výkon a výjimečný open source. Tiskárna nabízí automatickou kalibraci a kompenzaci podložky. Tuto verzi je možné jí upravit upgradem na 4 materiálovou tiskárnu.



Obr. 34 Popis 3D tiskárny Original Prusa i3 MK2S [12].

Oproti verzi MK2 je navíc tiskárna vylepšena o hladké pojezdové tyče, kvalitnější ložiska LM8UU. Vylepšené je také uchycení ložisek a spojovací materiál. Spojení lepších tyčí a ložisek znamená snížení hlukosti. Dalším vylepšením je zesílené přichycení indukční sondy pro automatické vyrovňávání podložky. Vyměněny byly také zadní kryt elektroniky a vedení vodičů od tiskové hlavy.

Parametry Original Prusa i3 MK2S:

- pracovní plocha – 10500 cm³ (25 x 21 x 20 cm),
- integrovaný LCD,
- tisk z SD karty (8 GB v balení) nebo z počítače přes USB,
- tryska E3D V6 Full,
- velikost trysky 0,4 mm pro 1,75 mm tiskovou strunu,
- výška vrstvy od 0,05 mm do 0,35 mm,
- maximální rychlost tisku 200 mm/s,
- plně automatická kalibrace tiskové plochy,
- vyhřívaná více zónová podložka,
- Bezúdržbová tisková plocha - nemáme sklo, ani není nutné plochu před tiskem nijak upravovat,
- podporované materiály – PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Flex, Laywood, Laybrick, Nylon, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, filamenty s uhlíkovým vláknem, polykarbonát a další materiály,
- jednoduchý barevný tisk po vrstvách,
- průměrná spotřeba 70 W (tisk PLA) nebo 110 W (tisk ABS),
- elektronika RAMBo - plně integrované drivery krokových motorů,
- GT2 řemeny,
- lineární ložiska,
- rám je vyfrézovaný z duralu a práškově lakován vysoce odolným lakem,
- vnější rozměry 42x42x38 cm,
- váha 6,5 kg,
- CE certifikace,
- optimalizovaný firmware pro tichý tisk,
- 18 990 Kč cena stavebnice, podpora přes fórum, bez školení,
- 26 990 Kč cena sestavené, kalibrované a otestované tiskárny s prémiovou podporou po telefonu a se zaškolením



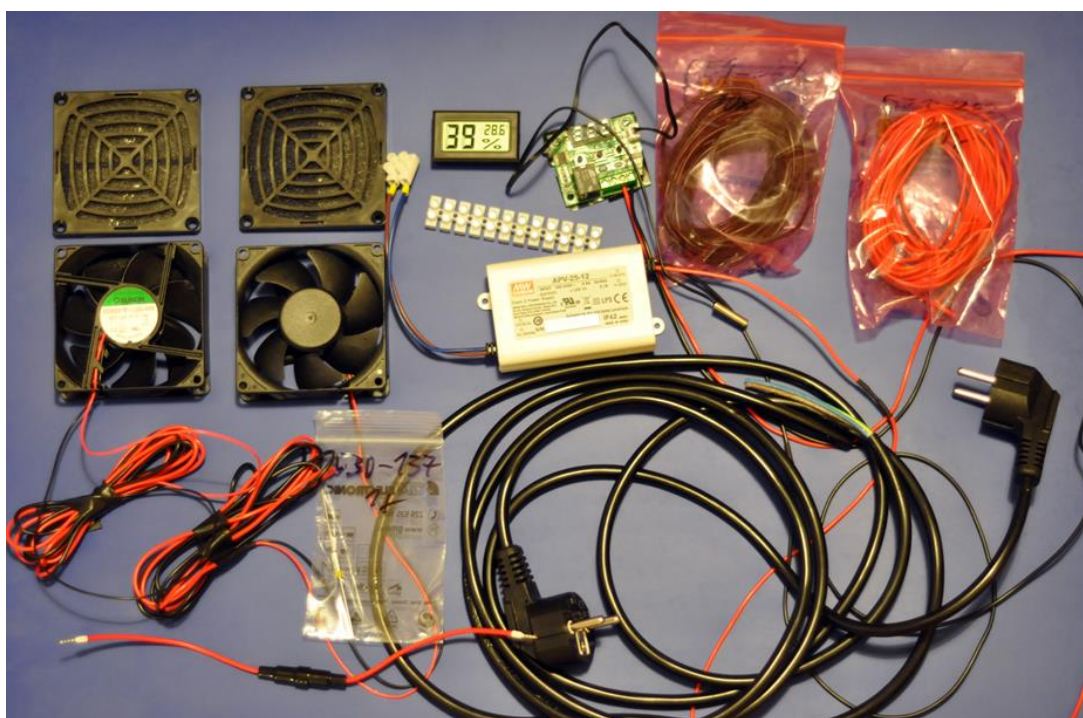
Obr. 35 Original Prusa i3 MK2S v typicky oranžové a nově i černé barvě [12].

3.2.2 Vzdálené ovládání 3D tiskárny

Aby nebyla nutná přítomen po celou dobu tisku celou, tak bylo využito kamery v notebooku, sdílené obrazovky na počítači, internetu a aplikace TeamViewer v mobilním zařízení i notebooku. Spojením těchto zařízení a aplikací bylo možné vícehodinový tisk kontrolovat, případně ho zcela zastavit vzdáleně pomocí mobilního telefonu. Snížila se tak pravděpodobnost znehodnocení dílu, který se tiskne mnoho hodin.

3.2.3 Box na 3D tiskárnu

Box byl zhotoven z dvou stolků Lack o rozměrech 55 x 55 x 50 cm, zakoupených v obchodním domě Ikea. Pro zajímavější design boxu byla vybrána horní deska bílá, zbytek boxu je v barvě černé. Jednotlivé komponenty stolku k sobě byly připevněny pomocí pravouhlých L profilů proto, aby vůči sobě byly nohy stolu a horní i spodní deska v jedné rovině. Tím bylo dosaženo po připevnění plexiskla silikonem ideálního utěsnění. Přední plexisklo bylo připevněno pouze izolepou, protože původně namontované magnety byly moc silné. V budoucnu bude otevírání boxu předěláno na nastavitelné panty. Do zadní desky byly zhotoveny otvory pro kabeláž a pro větráky, které v kombinaci s další elektronikou umožňují regulaci teploty v boxu. Do středu horní desky byl vyvrtán otvor a do něj byla umístěná trubička, kterou prochází filament do prostoru boxu. Bílý stojan na cívku s filamentem byl vytisknutý z materiálu ASA. Jako spojovací materiál byl použit silikon, vruty do dřeva, šrouby a matky přiměřené velikosti. Dodatečně byly původní filtry vyměněny za HEPA filtry, které zachycují škodlivé částice, které se uvolňují při tavení plastů vyrobených z ropy.



Obr. 36 Elektronika instalovaná do boxu.

3.2.4 Tlumící podložka pod tiskárnu

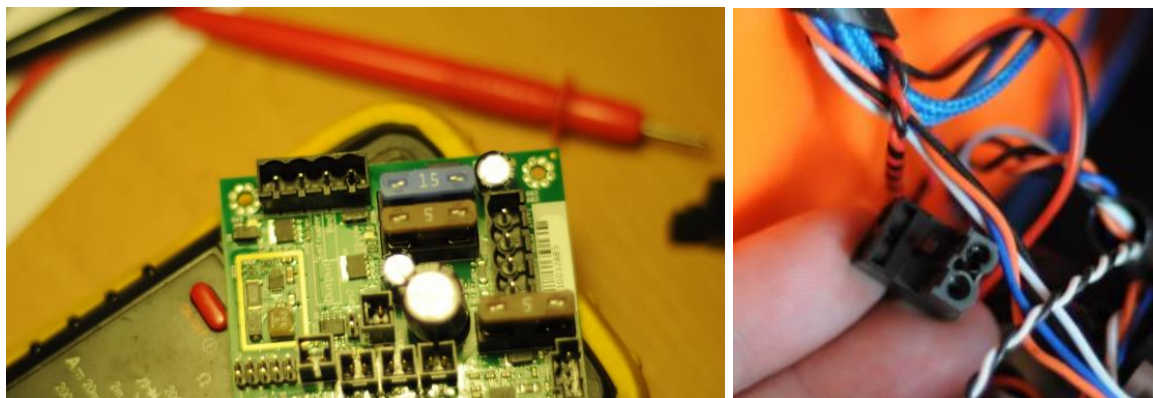
K tlumení vibrací byla pořízena tlumící gumová podložka pod pračku pořízené v obchodním centru OBI za necelých 200 Kč.



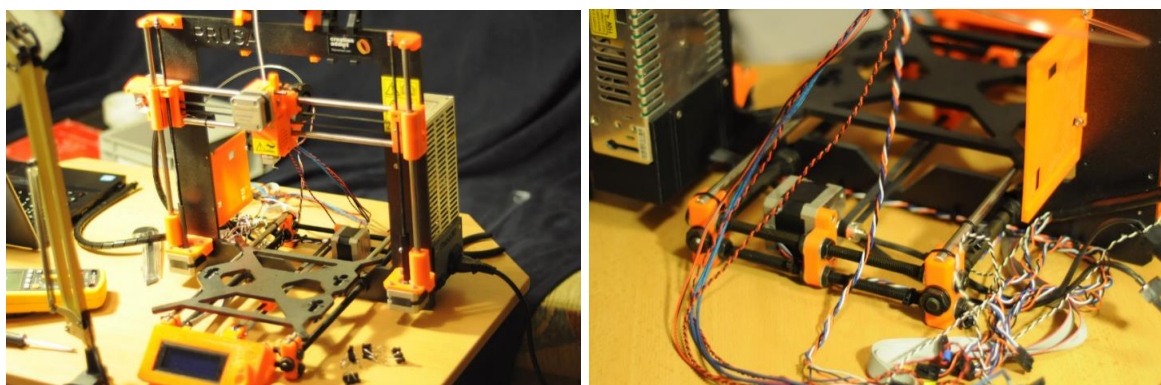
Obr. 37 Tlumící gumová podložka.

3.3 Demontáž původní 3D tiskárny

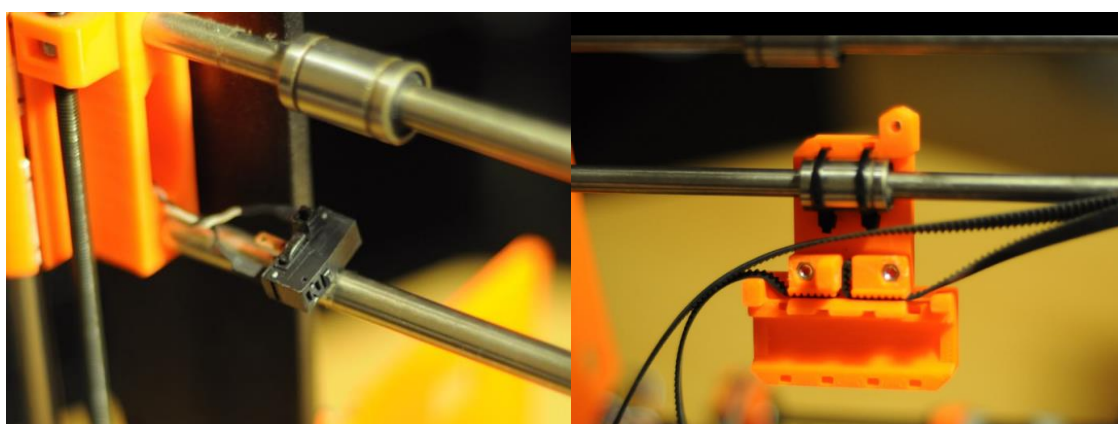
Demontáž 3D tiskárny Original Prusa i3 Plus byla poměrně rychlá a trvala jen 3 hodiny. Přestavbu urychlilo vypálení pojistky k vyhřívané podložce na původní verzi 3D tiskárny.



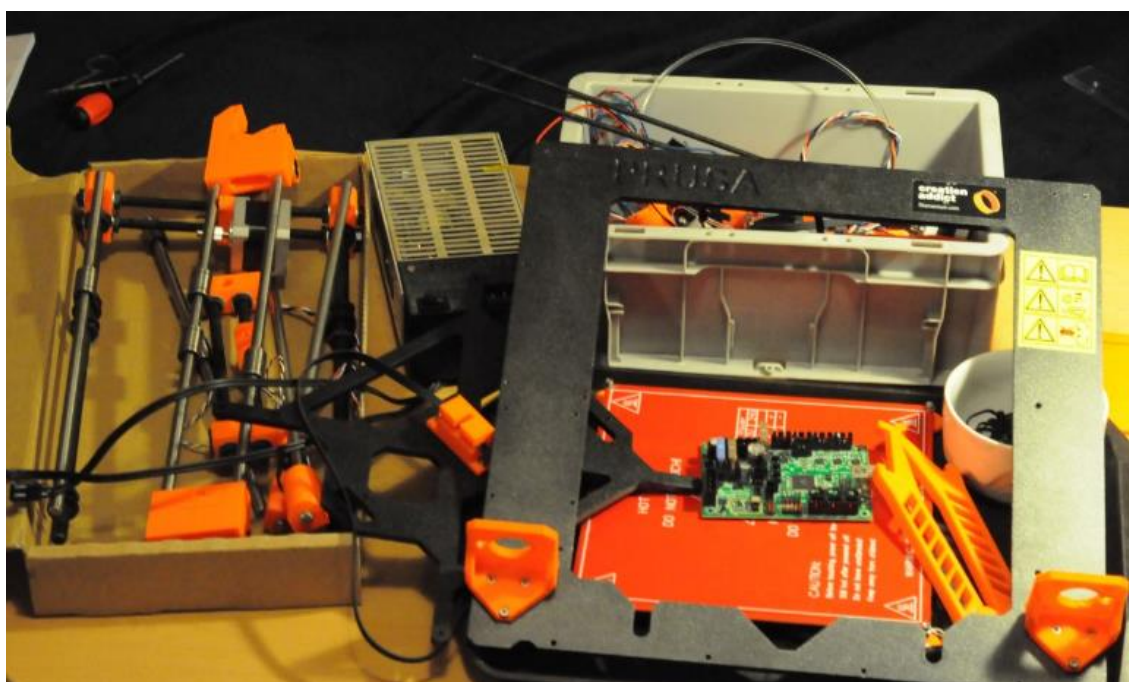
Obr. 38 Vypálené konektory k vyhřívané podložce.



Obr. 39 Demontáž 3D tiskárny Original Prusa i3 Plus.



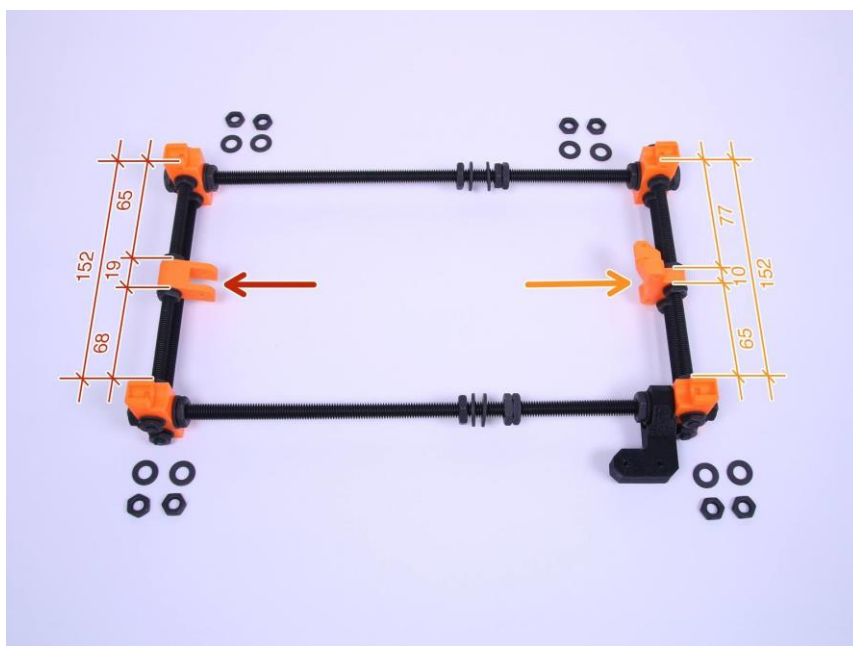
Obr. 40 Demontáž 3D tiskárny Original Prusa i3 Plus.



Obr. 41 Kompletně demontovaná 3D tiskárna Original Prusa i3 Plus.

3.4 Sestavení inovovaného řešení

Po zkontrolování všech součástí v balení byla sestavena osa Y. U ní bylo důležité, aby byla základna tiskárny přesně sestavena. Proto bylo použito digitální posuvné měřidlo. Jednotlivé díly byly na svorkovnicích rozměřovány s maximální přesností dle návodu.



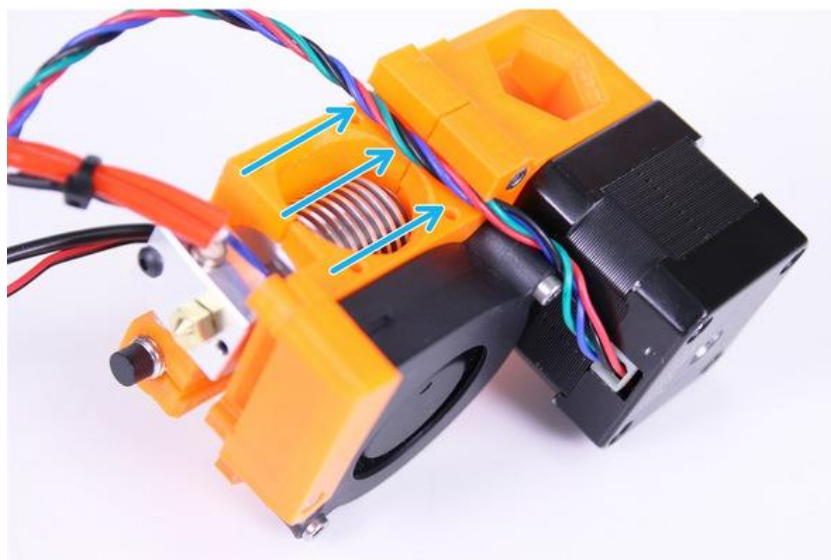
Obr. 42 Montáž 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S [12].

Následovalo sestavení Y pojezdu - připevnění ložisek na hliníkový rám. Bylo třeba dbát na správnou orientaci rámu. Při vložení dodaných tyčí do ložisek bylo nutné zkontrolovat vzájemnou rovnost ložisek. Tyče musely hladce procházet bez použití větší síly



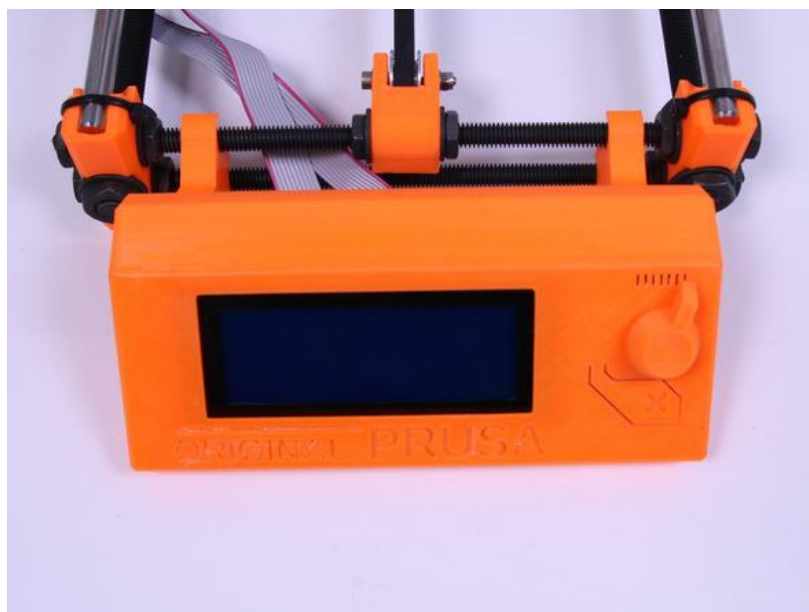
Obr. 43 Montáž 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S [12].

Dále bylo pokračováno v montáži motoru Y, koncového spínače, dvou držáků řemene. Při napínání řemeničky bylo nutné dbát na pevné napnutí a zároveň nepoužít velkou sílu, aby nedošlo k jejímu poškození. Podobně bylo pokračováno i pro osu X a Z. Následovalo vzájemné spojení všech os. Bylo třeba dbát maximální přesnosti, aby všechny osy byly kolmé vůči sobě. Toho bylo dosaženo postupným dotahováním příslušných matek.



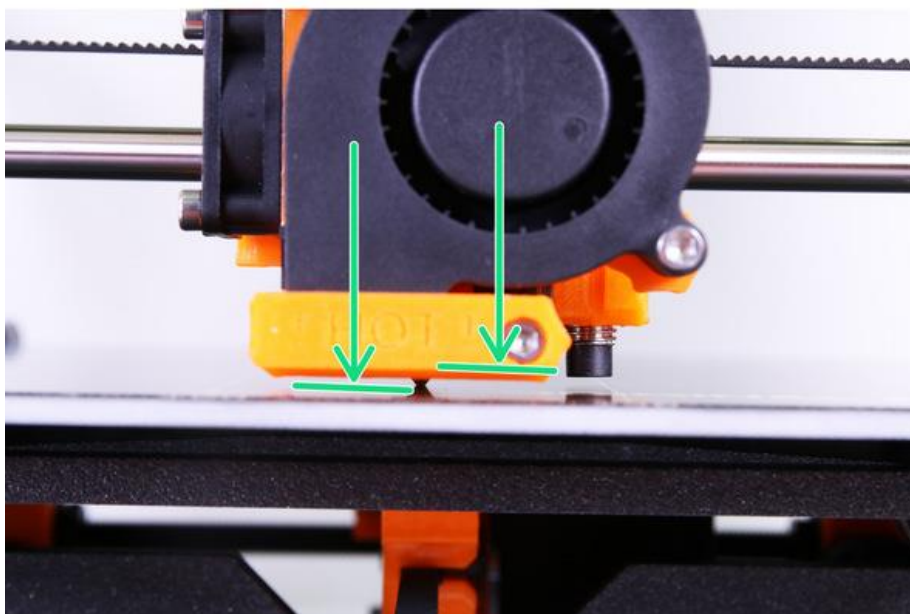
Obr. 44 Montáž 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S [12].

Následovala příprava extrudéru. Celá konstrukce obsahuje motor, 2 větráčky, trysku a autokalibrační sondu.



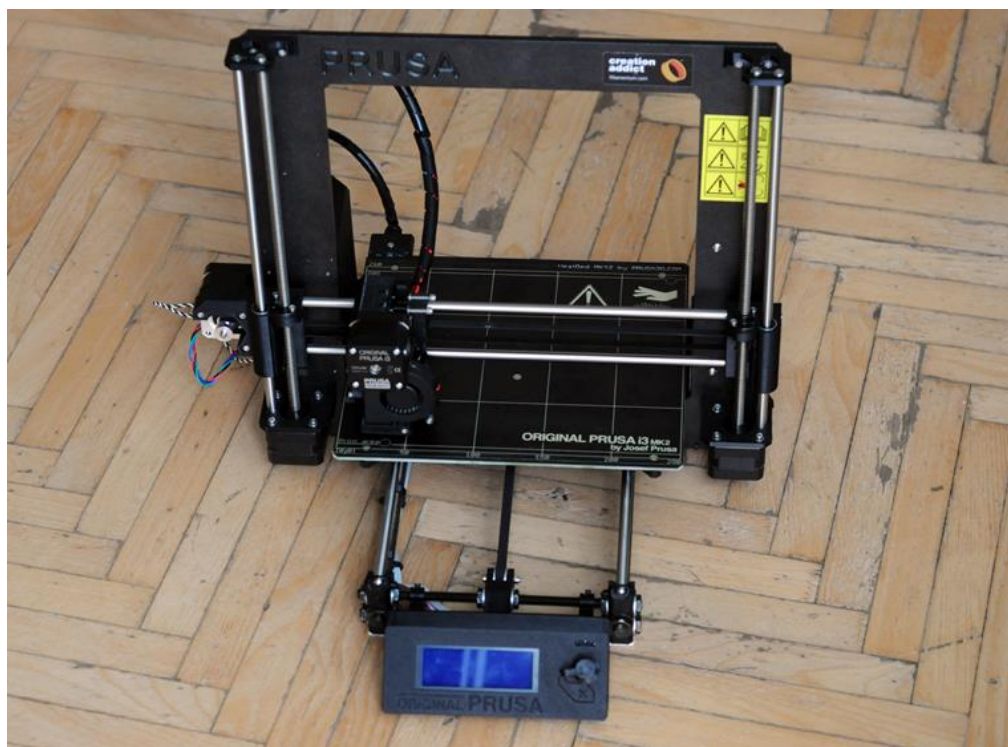
Obr. 45 Montáž 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S [12].

Jedna z nejtěžších částí při kompletaci byl LCD display.



Obr. 46 Montáž 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S [12].

V další části montáže byla doplněna vyhřívaná podložka, držák cívky a elektroniku. Nakonec byla provedena kalibrace sondy a upravena kabeláž.



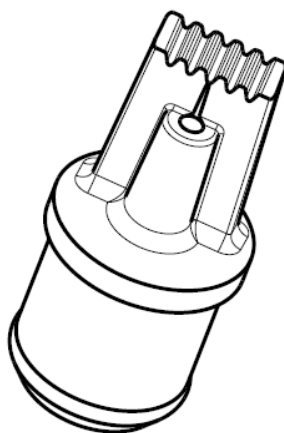
Obr. 47 Téměř smontovaná 3D tiskárna Original Prusa i3 MK2S.

3.5 Testované modely

K porovnání přínosu inovace byly vybrány 3 modely a to stěrka na lepidlo, krytka rohu nemocničního lůžka a model lva stažený z databáze Thingiverse. Kromě těchto modelů probíhalo testování nastavení parametru a materiálu na mnoha dalších dílech. Ty ale nejsou porovnávány v této práci.

3.5.1 Stěrka na lepidlo (Koh-I-Noor)

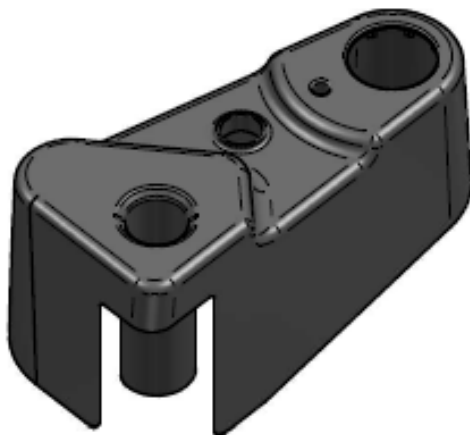
Tento díl slouží k roztírání tekutého lepidla, které je na trhu již desítky let. Model stěrky byl vytvořen v konstrukčním programu Creo 3. Podle modelu byla následně vyrobena několikanásobná vstřikovací forma.



Obr. 48 Model stěrky lepidla.

3.5.2 Krytka rohu (Linnet)

Druhým tisknutým modelem byla krytka rohu nemocničního lůžka společnosti LINET spol. s.r.o.. Na tomto díle byla zákazníkem objednána modifikace, které spočívala ve změně tvaru na jedné z kavit vstřikovací formy. Díky tomu bylo možné prakticky vyzkoušet přínos prototypu během praktické realizace změny designu dílu. Autor diplomové práce je konstruktérem vstřikovací formy pro tento díl.



Obr. 49 Model krytky rohu nemocničního lůžka.

3.5.3 Lev

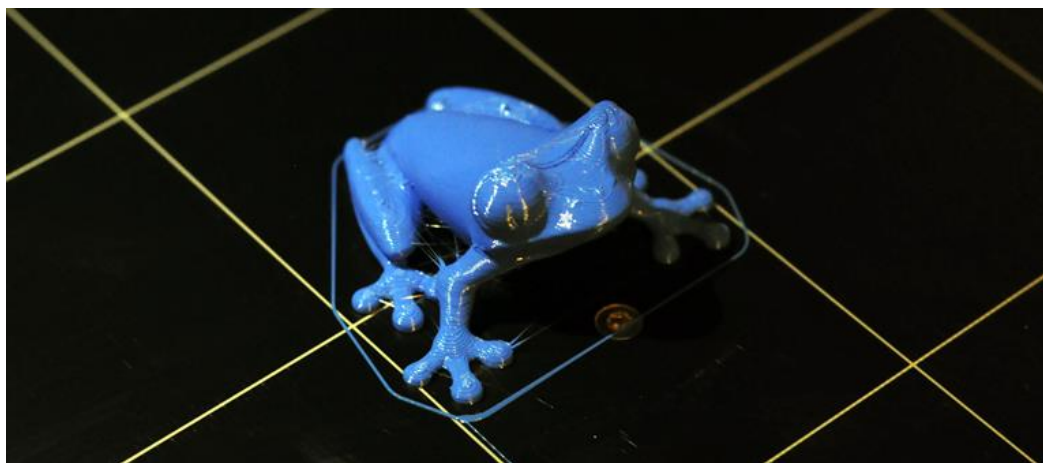
Model Iva byl stažen z databáze Thingiverse.

3.6 Testované materiály

Nejvíce používaným materiálem při testování bylo PLA, ABS, ASA a nylon s karbonem.

Tab. 1 Ceny nejvíce používaných materiálů.

Materiál	Barva / Označení	Výrobce	Cena za 1 kg
PLA	bílá	Prusa Research	549 Kč
PLA	Traffic Black	Fillamentum	756 Kč
PLA	Metallic Green	Plasty Mladeč	545 Kč
ASA	Natural	Fillamentum	828 Kč
ABS	Black	Devil Design	560 Kč
Nylon CF15	Carbon	Fillamentum	2 340 Kč
Flexfill 98A	Sky blue	Fillamentum	1 836 Kč



Obr. 50 Rosnička vytištěná z materiálu Flexfill 98A.

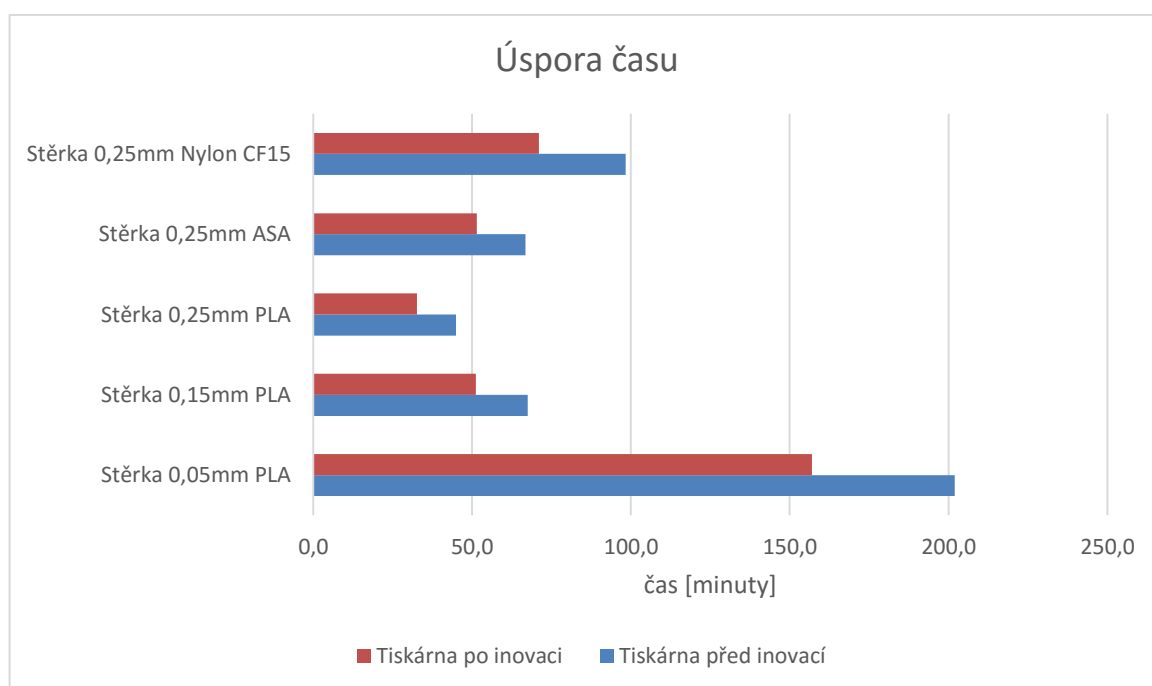
3.6.1 Nastavení parametrů tisku 3D tiskárny

Modely byly tisknuty ze stejného G-kódu na původním i inovovaném řešení 3D tiskárny. Nastavené parametry byly tedy pro řešení před inovací i po inovaci shodné. G-kód pro tisk dílů byl připraven v programu Slic3r.

3.6.2 Tisk stěrky na lepidlo

Tab. 2 Doba tisku stěrky na lepidlo podle výšky vrstev a materiálu v minutách.

Materiál	Tiskárna před inovací	Tiskárna po inovaci	Úspora času [%]
Stěrka 0,05mm PLA	202,0	157,0	28,7
Stěrka 0,15mm PLA	67,5	51,2	31,8
Stěrka 0,25mm PLA	44,9	32,6	37,7
Stěrka 0,25mm ASA	66,8	51,5	29,7
Stěrka 0,25mm Nylon CF15	98,3	71,0	38,5



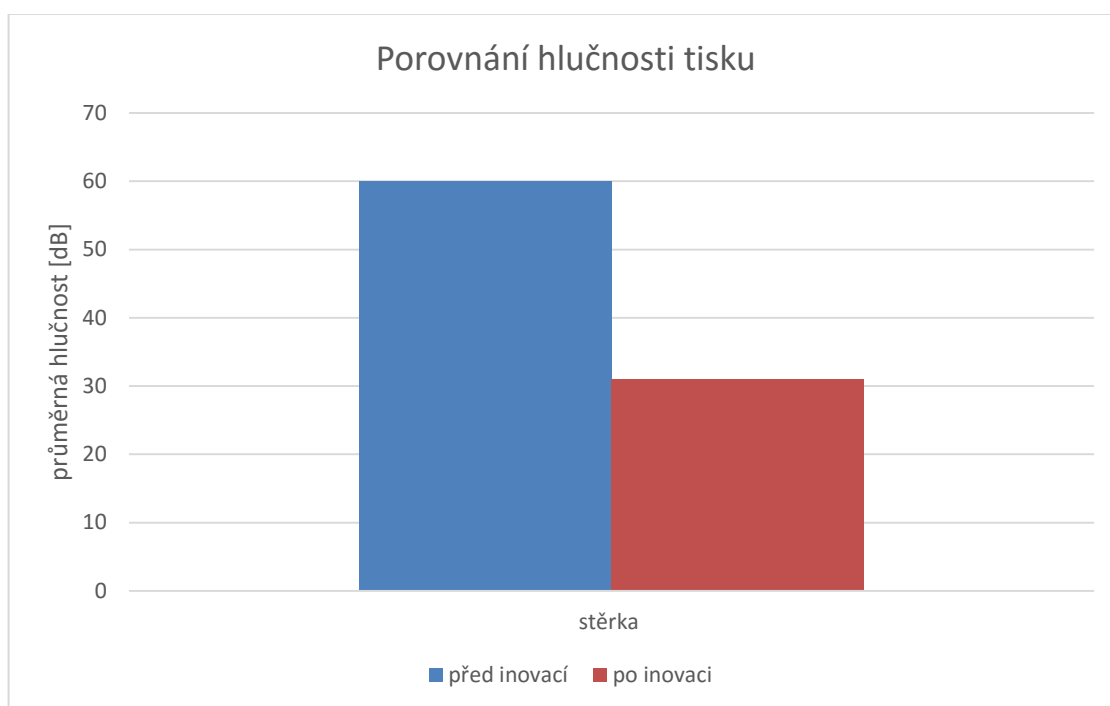
Obr. 51 Grafické znázornění doby tisku stěrky.



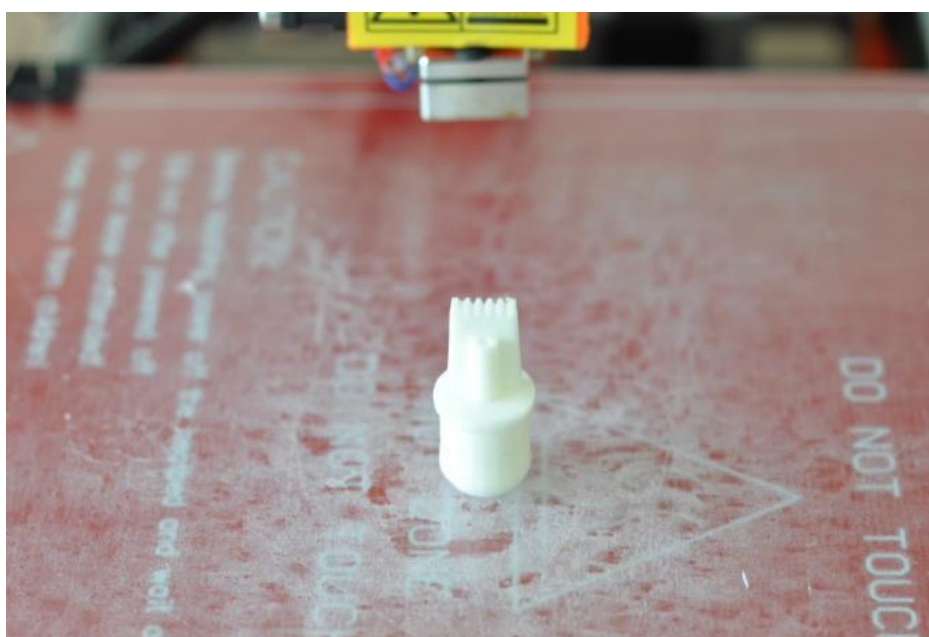
Obr. 52 Vzorky stěrky na lepidlo.

Tab. 3 Porovnání hlučnosti před a po inovaci.

Model	před inovací [dB]	po inovaci [dB]	snížení hlučnosti [%]
stěrka	60	31	93,5

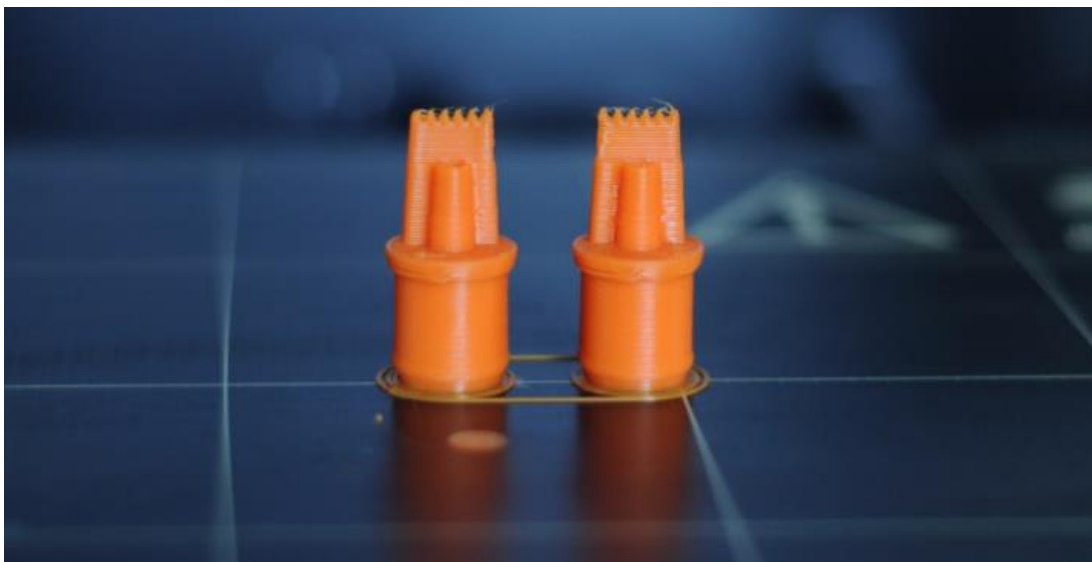


Obr. 53 Grafické vyhodnocení hlučnosti před inovací a po inovaci.



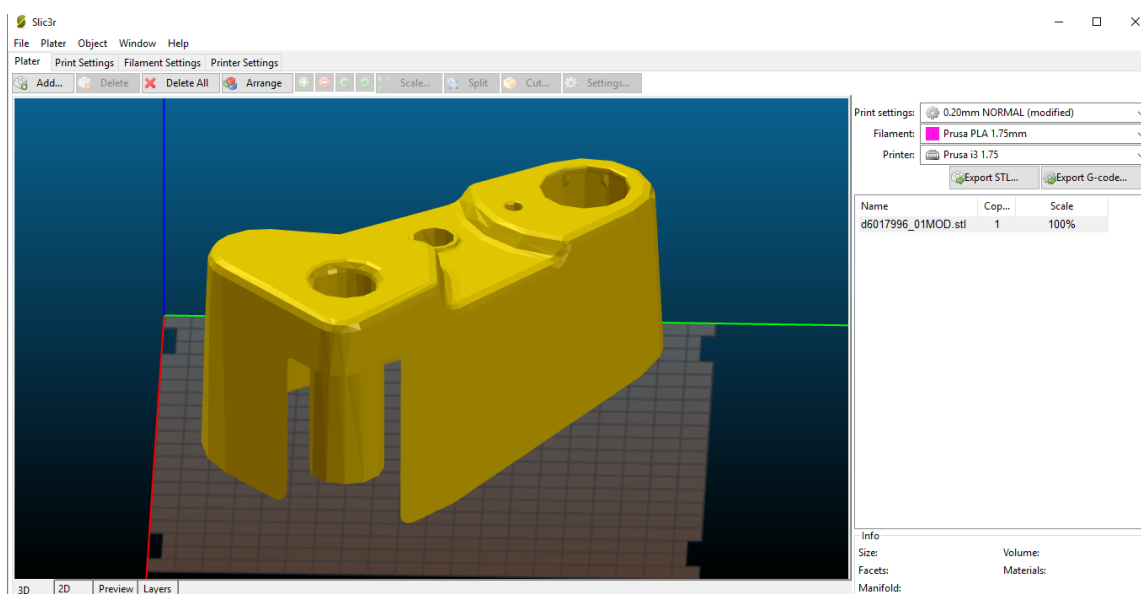
Obr. 54 Vytisknutá stěrka na lepidlo před inovací.

Kromě tisknutí modelu stěrky po jednom kuse bylo testované optimální řešení pro tisk za účelem dosažení co nejlepšího povrchu a přesnosti dílu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při tisku 2 modelů vedle sebe s využitím funkce brim.



Obr. 55 Tisk dvou dílů vedle sebe s využitím brimu výrazně zlepšilo kvalitu tisku.

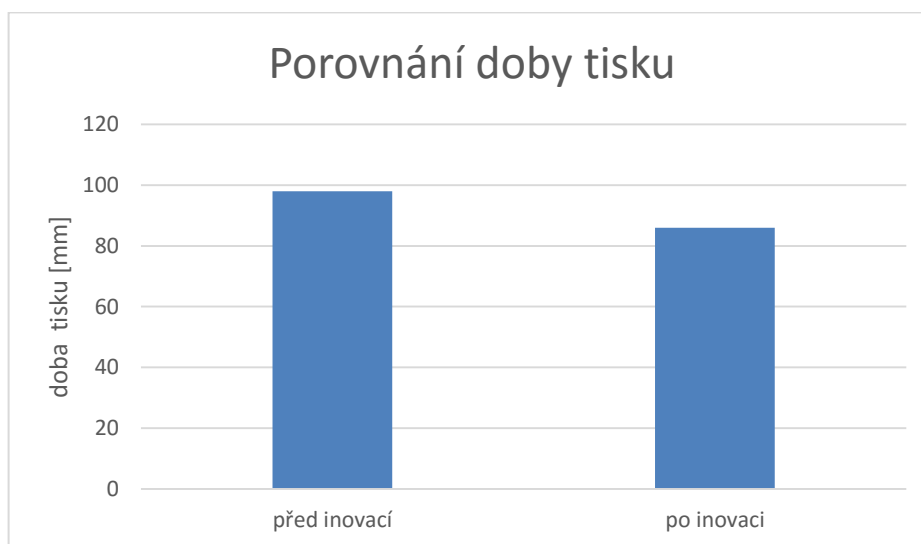
3.6.3 Tisk prototypu krytky rohu



Obr. 56 Krytky rohu v programu Slic3r.

Tab. 4 Doba tisku krytky rohu v minutách – materiál PLA.

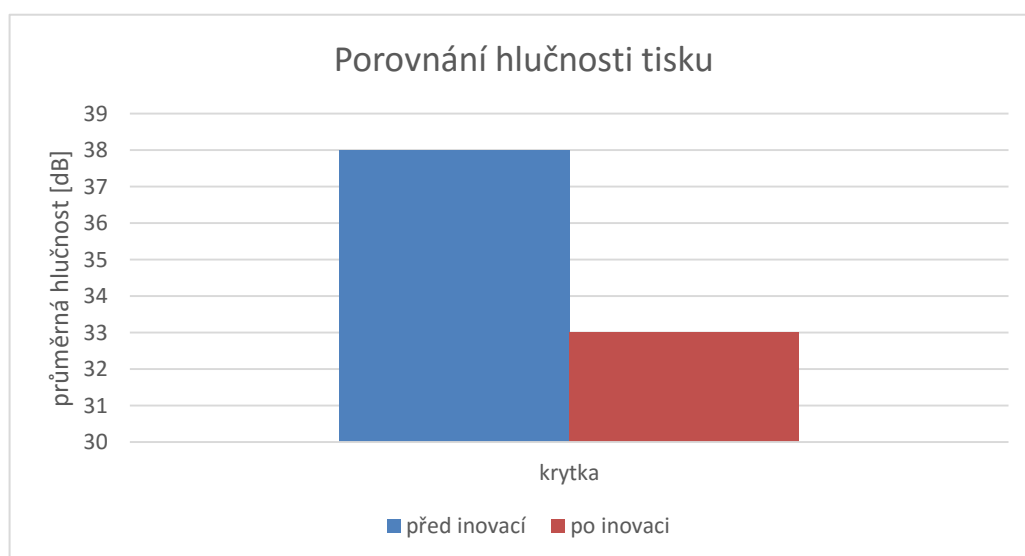
Model	Před inovací	Po inovaci	Úspora času [%]
Krytka rohu - vrstva 0,25mm	98	86	14,0
Krytka rohu - vrstva 0,35mm		73	



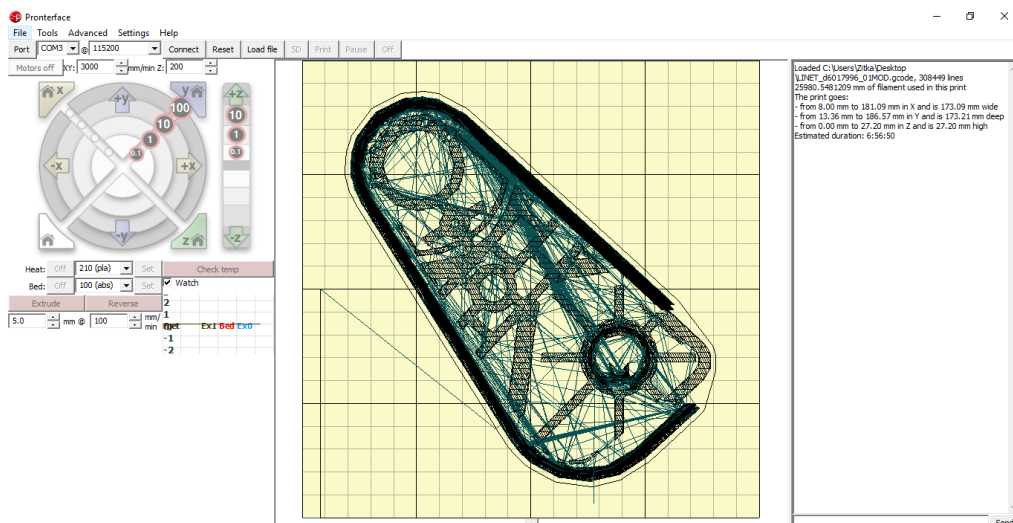
Obr. 57 Grafické znázornění doby tisku krytky rohu.

Tab. 5 Porovnání hlučnosti před a po inovaci.

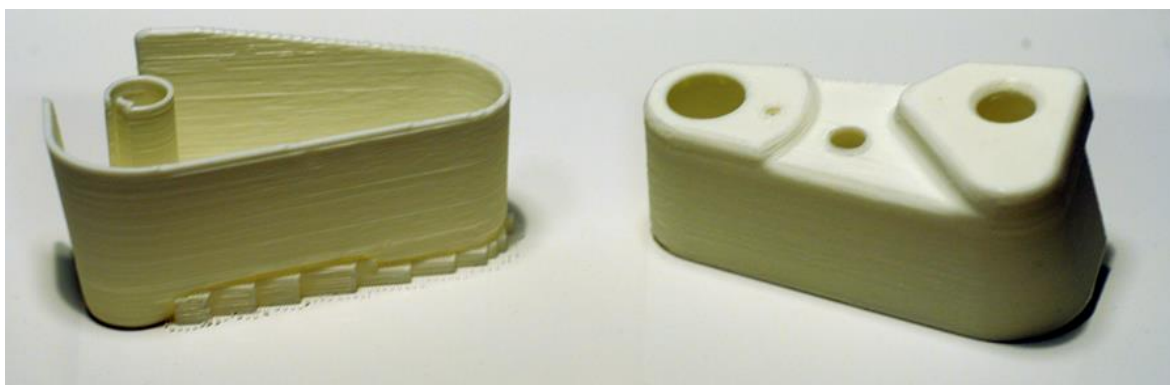
Model	před inovací [dB]	po inovaci [dB]	snížení hlučnosti [%]
krytka	38	33	15,2



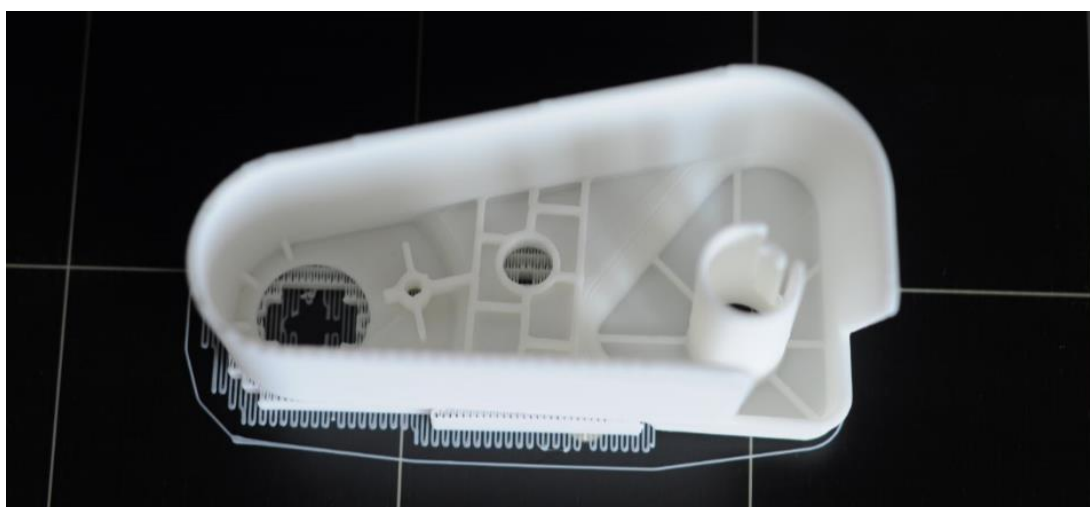
Obr. 58 Grafické vyhodnocení hlučnosti před inovací a po inovaci.



Obr. 59 Generování G-kódu krytky v programu Pronterface.

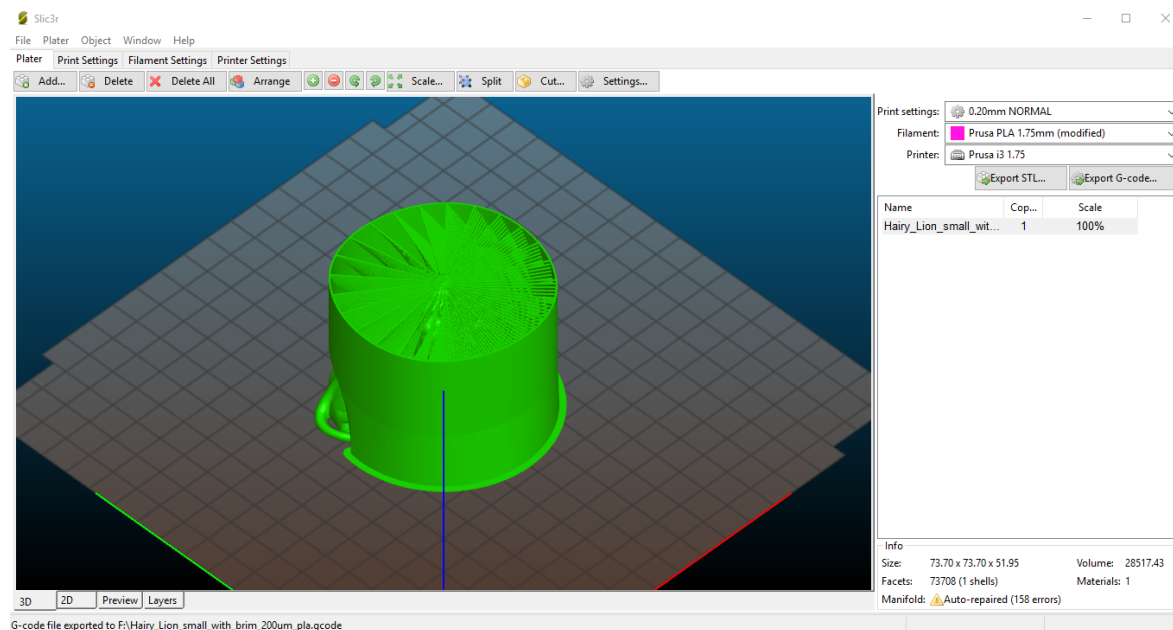


Obr. 60 Krytka rohu vytištěná na tiskárně před inovací a po inovaci.



Obr. 61 Krytka rohu vytištěná pomocí podpor na inovované 3D tiskárně.

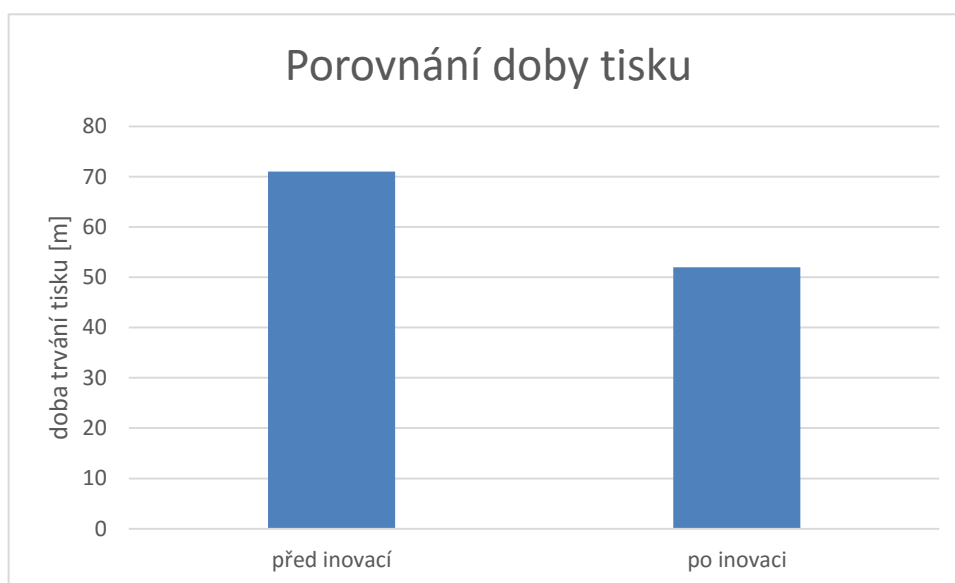
3.6.4 Tisk modelu Iva



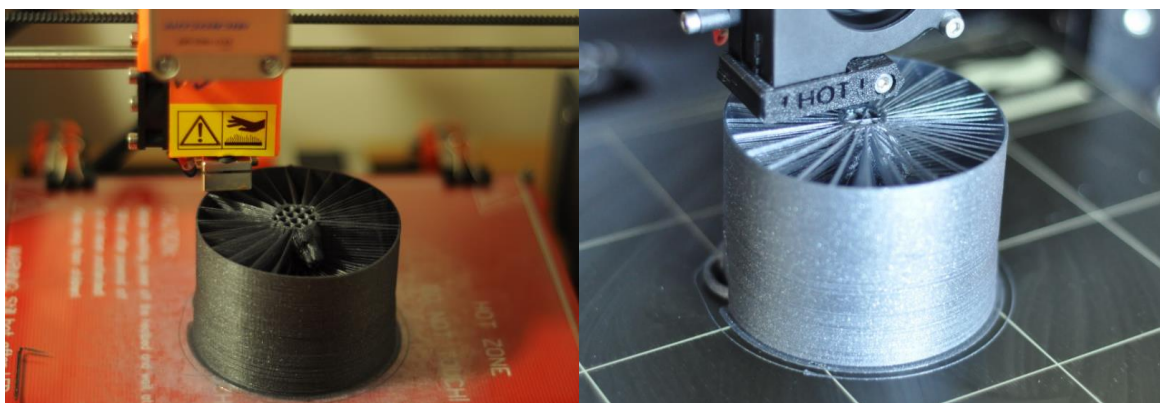
Obr. 62 Generování G-kódu modelu Iva v programu Pronterface.

Tab. 6 Doba tisku Iva v minutách – materiál PLA.

Model	před inovací	po inovaci	úspora času [%]
lev - vrstva 0,20mm	71	52	36,5



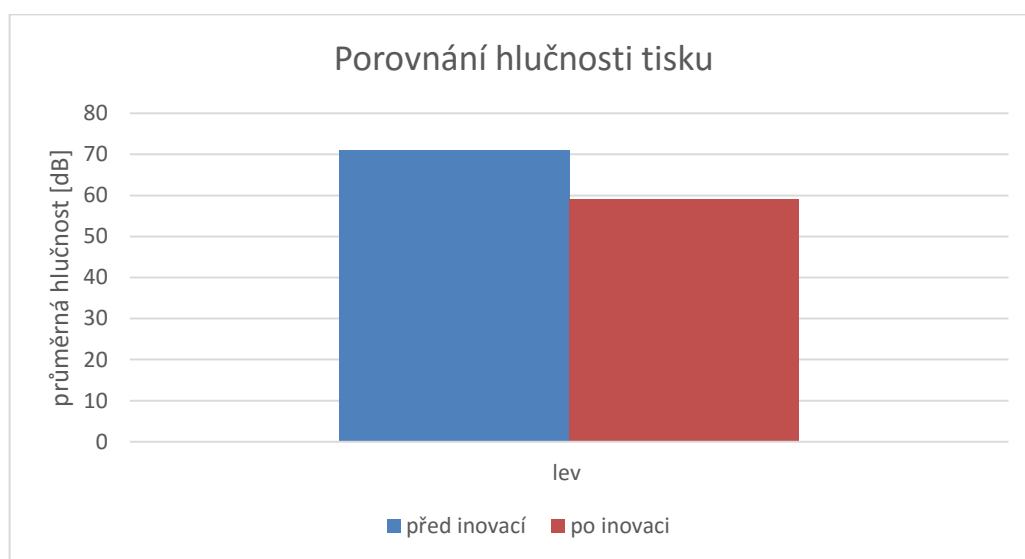
Obr. 63 Grafické znázornění doby tisku modelu Iva z PLA.



Obr. 64 Tisk modelu lvu z PLA před inovací a po inovaci.

Tab. 7 Porovnání hlučnosti před a po inovaci.

Model	před inovací [dB]	po inovaci [dB]	snížení hlučnosti [%]
lev	71	59	20,3

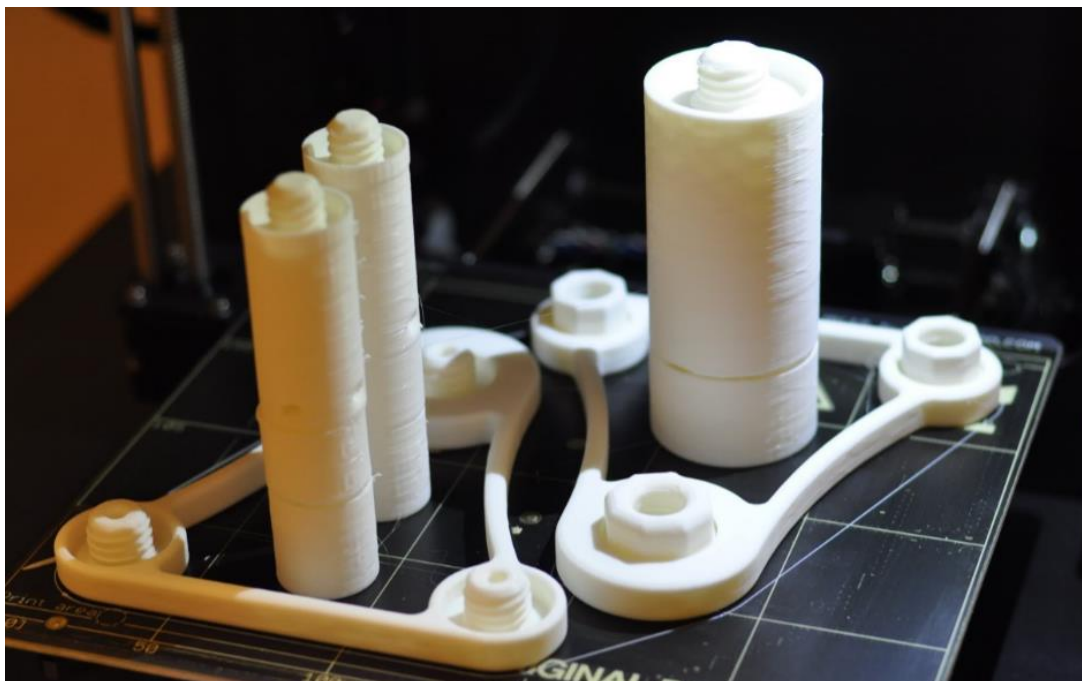


Obr. 65 Grafické vyhodnocení hlučnosti před inovací a po inovaci.

3.7 Dokončovací operace

Při tisku některých dílů bylo nutné použít podpěry. Ty bylo potřeba po dokončení tisku odstranit. Pokud nešly podpory odlomit, tak se pro jejich odstranění osvědčil nůž, případně chirurgický skalpel. Po odstranění podpor byl povrch broušen pro dosažení lepšího povrchu.

Model Iva byl po dotisknutí ořezán nožem a vyfénován, tím vzniknul efekt rozevláté hřívy.



Obr. 66 Na válečcích držáku na filament byla nutná povrchová úprava pomocí tmelu a broušení.



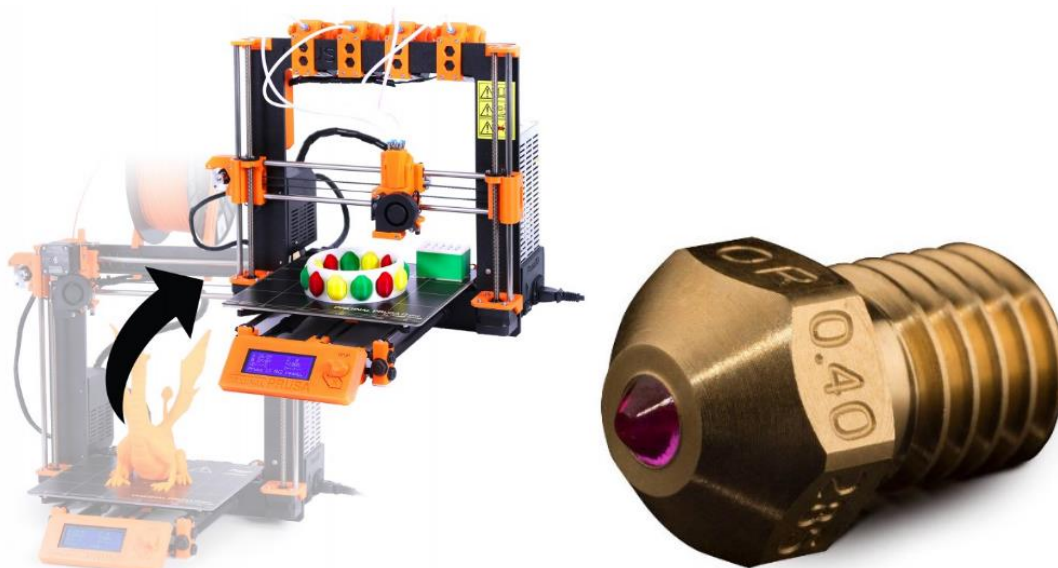
Obr. 67 Oříznutý model Iva bylo nutné vyfénovat.

3.8 Návrhy na další inovace

V dalším vylepšování 3D tiskárny a hlavně boxu bude dále pokračováno.

Níže jsou některé z návrhů na další inovaci:

- výměna stávajících ventilátorů chlazení extruderu za ventilátory s menším průtokem vzduchu,
- přestavba tiskárny pomocí kitu Original Prusa I3 MK2 Multi Material, díky němuž bude možné tisknout až 4 materiály najednou s jednou tryskou,
- přestavba boxu na box vyhřívaný pomocí peliteri, hliníkového chladiče, zdroje a s využitím bezpečnostních senzorů,
- umístění elektroniky 3D tiskárny mimo vyhřívaný box,
- osazení 3D tiskárny HD kamerou,
- pořízení trysek o různých průměrech pro testování dalších materiálů,
- využití rubínové trysky Olsson pro velmi abrazivní materiály,
- využití programu Simplify3D pro optimalizaci nastavení tiskových parametrů a podpor,
- využití programu Octoprint.



Obr. 68 Na levé straně je 3D tiskárna MK2 Multi Material a na pravé straně je rubínová tryska od společnosti Olsson k tisku velmi abrazivních materiálů.

4 IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ DO PRAXE

Účelem experimentu byla snaha o snížení hlučnosti tiskárny a zlepšení jak samotného tisku, tak také obsluhy 3D tiskárny. Bylo posuzovaná možnost využití 3D tiskárny typu RepRap po její inovaci v podmínkách osobního užívání a v prostředí firmy Koh-I-Noor Formex s.r.o..

4.1 Představení společnosti Koh-I-Noor Formex s.r.o.

Společnost nabízí svým zákazníkům komplexní řešení zakázek technologického vývoje vylisku, konstrukci a výrobu formy, vyzkoušení a ověření procesu vstřikování, sériovou výrobu vstřikovacích dílců a logistický proces. Mezi její zákazníky patří například Automotive Lighting, Hella, Varroc Lighting Systems, Koito, Witte, Magna, Škoda, Seat a další.

Již přes 20 let se věnuje konstrukci a výrobě precizních vstřikovacích forem. Po přesunutí do nových prostor v roce 2011 přibyla k nástrojárně také lisovna plastů a společnost tak rozšířila své portfolio o výrobu plastových dílců se zaměřením na světlomety a pohledového interiérové dílce. V roce 2015 koupil společnost Koh-i-noor a zařadil jí do divize Koh-I-Noor Machinery, která se zaměřuje na strojírenství a automobilový průmyslu.



Obr. 69 Koh-I-Noor Formex s.r.o. v Brně [27].

4.2 Využití v podmínkách společnosti Koh-I-Noor Formex

Z důvodu režimu utajení pod NDA nebylo možné prezentovat většinu vytištěných prototypových dílů v diplomové práci. Pro praktickou ukázkou uplatnění 3D tisku v praxi byly tedy použity díly mimo automobilový průmysl a i v těchto případech bylo nutné svolení zákazníka. Technická dokumentace, ani další podrobnosti k těmto dílům nejsou uvedeny kvůli konkurenci.



Obr. 70 Typický sortiment společnosti KIN Formex [27].

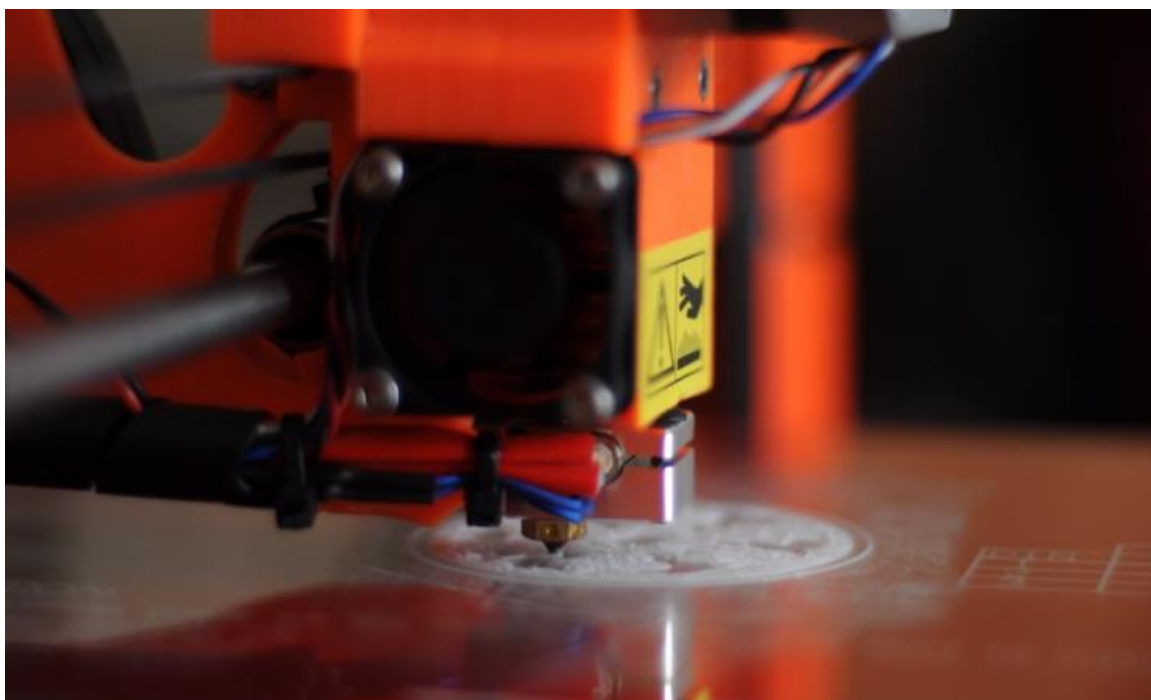
Z pohledu společnosti představuje 3D tisk pomocí inovované tiskárny příležitost rychlé realizace v oblasti prototypu, návrhu designu i tisku finálních dílů s minimálními finančními vstupními náklady. Vyžaduje však technicky i manuálně zručnou obsluhu a více času. Slabinou tohoto řešení je absence servisu, protože byla 3D tiskárna pořízená jako stavebnice. Kvůli záruce i podpoře je tedy pro firmu vhodnější sestavená a kalibrovaná 3D tiskárna s kompletní zárukou a servisem.

3D tiskárna je postavená tak, aby byla co nejjednodušší. To ale neznamená, že by byla nekvalitní. Výhodou tohoto řešení je jeho otevřenost a možnost individuální nastavení.

Prototypy zhotovené na této tiskárně mohou pomoci ke kalkulaci nových zakázek a k následné nabídce s účelem vysvětlit zákazníkovi nabízené řešení na míru. Prototyp může sloužit po získání zakázky od přípravy projektu až po vylisování prvních dílů z formy. Prototypy zjednodušují představivost a snižuje faktor lidské chyby. Je také vhodný k fyzickému znázornění a jednoznačnému vyznačení specifických ploch – technický lesk, vysoký lesk, mechanický či chemický dezén. Dále je vhodný pro návrh optimálního balení určeného pro sériové dodávání vstříkovaných dílců k zákazníkovi. 3D tisk pomáhá k vývoji přípravku na měření. Po každé realizované změně může být díl vytištěn a popsán, aby bylo jednoznačně vidět, jakou historii úprav za sebou tento díl má a aby nedocházelo k záměnám při modifikacích vlivem nejednoznačného zadání.

Uplatnění může mít 3D tiskárna pro údržbu lisovny i nástrojárnu, protože je možné během chvíle zhotovovat jednoduché náhradní díly, různé krytky a držáky z odolných materiálů.

V neposlední řadě představuje tato technologie pro firmu konkurenční výhodu a to i přes to, že se nejedná o profesionální 3D tiskárnu.



Obr. 71 Ukázka 3D tisku jednoduché převodovky.

4.3 Využití inovovaného řešení v domácnosti a pro osobní použití

Díky snížení hlučnosti a omezení vibrací pomocí gumové podložky a uzavíratelného krytu je možné tiskárnu použít v bytě, aniž by její provoz rušil sousedy.

Při poškození součástky za pár korun se stává mnoho drahých spotřebičů a zařízení nepoužitelných. 3D tiskárna nabízí možnost vyrobit si poškozenou součást za pár korun a to aniž bychom někde chodili. Toto zařízení je tedy přímo předurčené pro domácí kutily a modeláře.

Doma můžeme vyrábět na počkání nejrůznější dárky, jako jsou šperky pro dámy, hračky pro děti, kryty a držáky na mobilní telefony, či nejrůznější příslušenství. Například originální držák na sportovní kameru GoPro stojí v řádech stokorun. S touto tiskárnou jsou náklady maximálně do desetikoruny. Vytisknutí lva uvedeného v experimentální části trvalo jen přibližně 2 hodiny a náklady na jeho tisk včetně materiálu byly 12 Kč.

Za úvahu jistě stojí i fakt, že zatímco se před rokem prodávalo měsíčně 500 tiskáren MK2, tak dnes se jich vyrábí měsíčně přes 5 000 a na trhu je jen jedna firma, která pro tento typ 3D tiskárny vyrábí uzavřený box a to za cenu bezmála 40 000 Kč. V tomto segmentu je tedy volný prostor pro podnikání. S jeho startem může pomoci například server Indiegogo, který je obdobou Kickstarteru, tedy mezinárodní služby pro získání peněz pro startup.



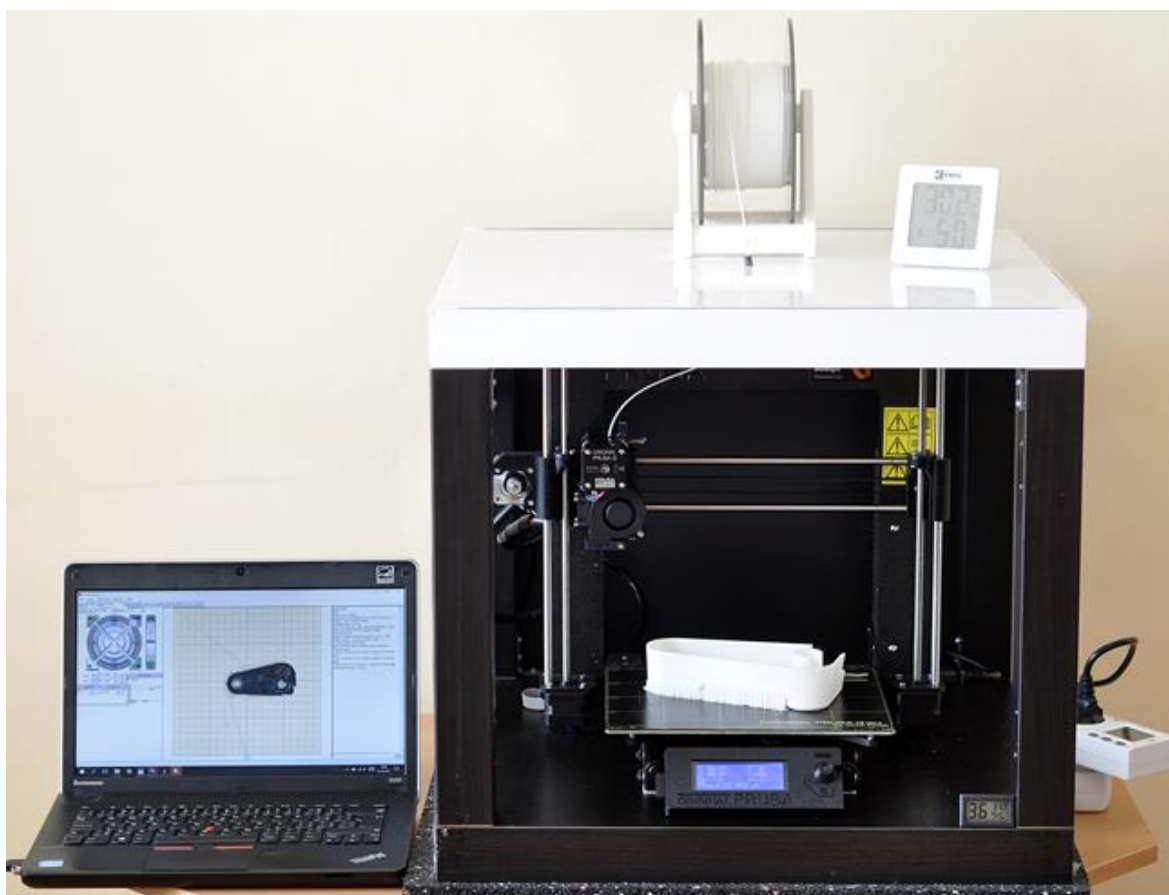
Obr. 72 Lev vytisknutý na inovované 3D tiskárně.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole jsou uvedené náklady na inovované řešení 3D tiskárny typu RepRap i náklady celkové, protože bez předchozího řešení by nebylo možné 3D tiskárnu inovovat.

Následuje vyhodnocení vybraných parametrů 3D tiskárny typu RepRap před inovací a po inovaci.

Během experimentální části bylo spotřebováno celkem 1,25 kg filamentu o průměru 1,75 mm od různých výrobců. Nejvíce používaným materiálem bylo PLA v bílé barvě. Jednoznačně nejlepších výsledků bylo dosaženo s filamenty české firmy Fillamentum. Přestože cena za 1 metr materiálu je v porovnání s ostatními výrobci mírně vyšší, tak se investice vyplatí z důvodu bezproblémového tisku, což se nedalo říct o materiálech od ostatních výrobců.



Obr. 73 Inovované řešení 3D tiskárny typu RepRap.

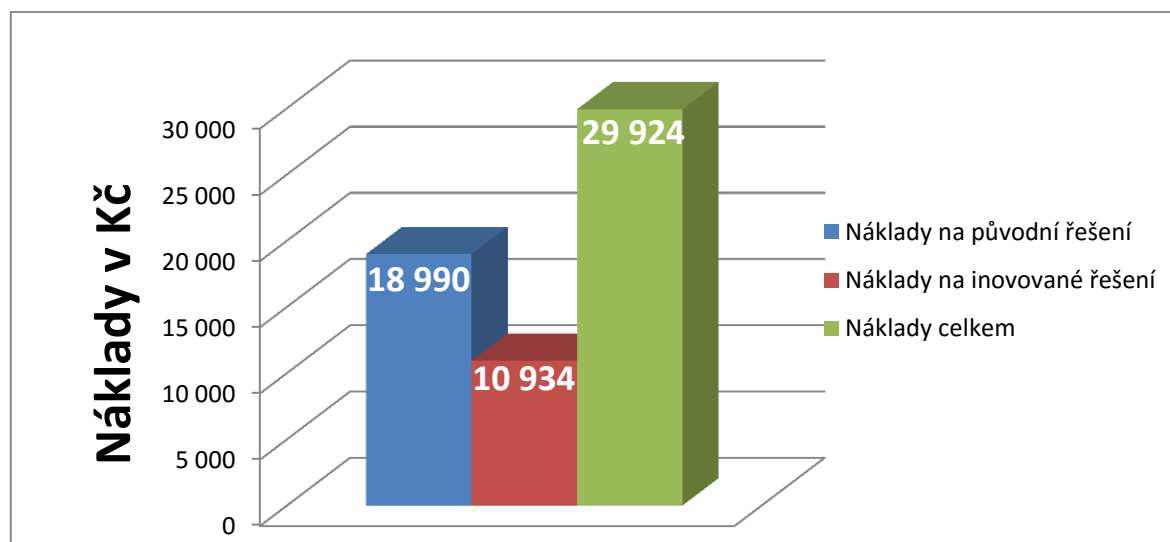
5.1 Vyhodnocení nákladů na inovované řešení

Tab. 8 Náklady na původní řešení.

	Náklady (Kč)
3D tiskárna Original Prusa MK1 I3 Plus - stavebnice	18 990
Náklady na původní řešení	18 990

Tab. 9 Náklady na inovované řešení.

	Náklady (Kč)
kit Original Prusa MK2S	7 608
2x stolek Lack Ikea	448
3x plexy sklo, 1x zadní deska	615
tlumící podložka	199
magnetické úchytky	119
elektronika na box	1 042
spojovací materiál z železářství	106
silikon	99
měřič spotřeby	399
měřič teploty a vlhkosti	299
Celkové náklady na inovované řešení	10 934



Obr. 74 Grafické znázornění nákladů.

Při stanovené hodinové sazbě 150 Kč za hodinu se investice do kompletního zařízení v hodnotě přibližně 30 000 Kč vrátí za 200 hodin tisku.

5.2 Vyhodnocení vybraných parametrů před inovací a po inovaci 3D tiskárny

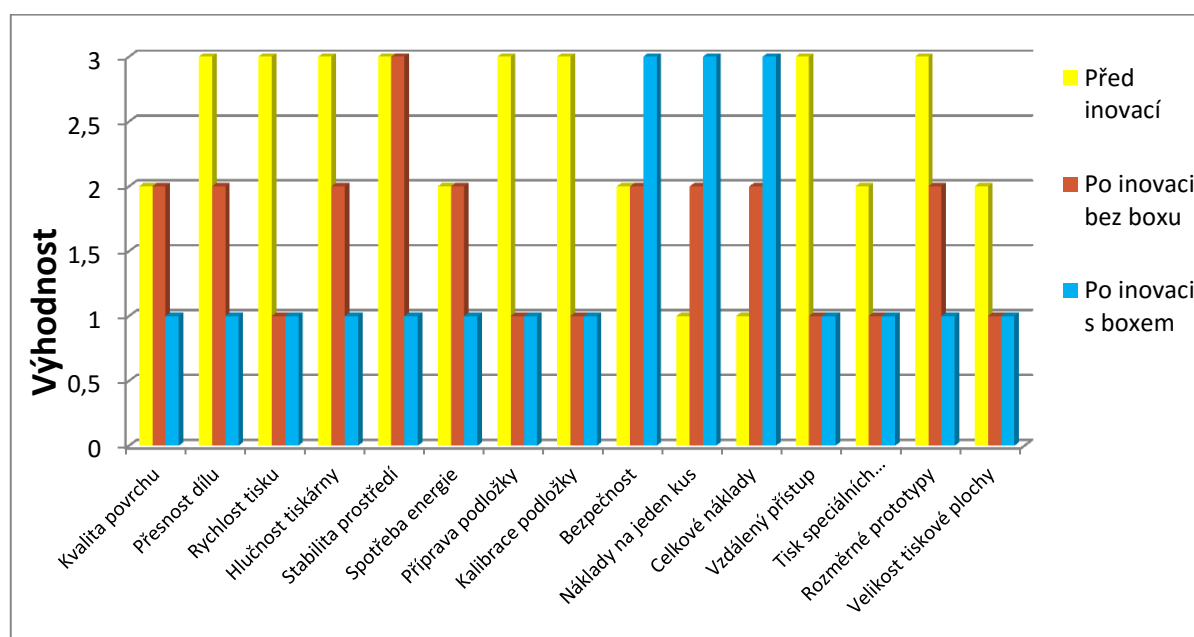
Z vyhodnocení jednoznačně vyplynuly výhody a přínos inovace.

Tab. 10 Náklady na inovované řešení.

	Před inovací	Po inovaci bez boxu	Po inovaci s boxem
Snadnost obsluhy	2	1	1
Kvalita povrchu	2	2	1
Přesnost dílu	3	2	1
Rychlost tisku	3	1	1
Hlučnost tiskárny	3	2	1
Stabilita prostředí	3	3	1
Spotřeba energie	2	2	1
Příprava podložky	3	1	1
Kalibrace podložky	3	1	1
Bezpečnost	2	2	3
Náklady na jeden kus	1	2	3
Celkové náklady	1	2	3
Vzdálený přístup	3	1	1
Tisk speciálních materiálů	2	1	1
Rozměrné prototypy	3	2	1
Velikost tiskové plochy	2	1	1
Celkový součet bodů	36,00	25,00	21,00
Celkové hodnocení	2,40	1,67	1,40

1 – nejvýhodnější nebo nejrychlejší

3 – nejméně výhodné nebo nejpomalejší



Obr. 75 Grafické vyhodnocení vybraných parametrů 3D tiskárny před inovací a po inovaci.

ZÁVĚR

Inovací bylo dosaženo zjednodušení samotné obsluhy 3D tiskárny. Velkým vylepšením je automatická kalibrace tiskové podložky, která je nově vyhřívaná více zónově. Nová podložka zvětšuje tiskovou plochu o 31 % a díky jejímu povrchu je nejen bezúdržbová, ale je možné na ní tisknout bez nanášení lepidla. Lepidlo bylo nutné použít pouze u nylonu s karbonem a u větších dílů z ASA a ABS. Původní tryska byla vyměněna za celokovovou E3D v6 full trysku, díky níž je nyní možné tisknout veškeré termoplasty včetně polykarbonátu a nylonu s karbonem nebo kevlaru. Podstatnou inovací byla vyměněna vodících tyčí osy Z za trapézové tyče, které ve spojení s novými krokovými motorky přispěly k dalšímu zkvalitnění. Deklarovaného zrychlení tisku až o 40 % nebylo dosaženo. Pro větší zrychlení tisku je nutná optimalizace tiskárny a hlavně optimalizace nastavení softwaru Slic3r pro přípravu tisku. Kritické části tiskárny byly vyztuženy.

Jednoduchým využitím webkamery, sdílené obrazovky na počítači, internetu a aplikaci TeamViewer v mobilním zařízení bylo možné vícehodinový tisk kontrolovat, případně ho zcela zastavit vzdáleně pomocí mobilního telefonu a nebyla tak nutná fyzická přítomnost u tisku.

Mimo inovace 3D tiskárny byl zhotoven i jednoduchý box, který minimalizoval proudění vzduchu, udržoval konstantní teplotu, stabilizoval proces a společně s využitím gumové podložky výrazně ztišil jinak hlučný chod tiskárny až o 35 %. HEPA filtr, využitý v boxu, zachycuje zdraví škodlivé částice, které vznikají při tavení filamentu vyrobeného z ropných produktů.

Výhoda boxu se nejvíce projevila u větších dílů při tisku materiálů ABS, ASA a nylonu s karbonem, kdy se díly o větších rozměrech méně deformovaly a nepraskaly. Osvědčilo se nahřátí podložky na 100 °C po dobu alespoň půl hodiny před tiskem. Tím se teplota v boxu zvýšila až na 45 °C. Některé díly na inovované RepRap tiskárně a boxu byly vytištěné na původní 3D tiskárně. Tím byla ověřena schopnost RepRapu v praxi.

V experimentální části byly testovány materiály od klasického PLA, ABS až po nové materiály s příměsí dřeva, karbonu či kevlaru. Z testovaných materiálů byl jednoznačně nejjednodušší tisk z PLA materiálu. Z tohoto důvodu se nejvíce hodí k tvorbě prototypů. Pro mechanicky namáhané díly se z testovaných materiálů jevil jako nejvhodnější Nylon CF15 Carbon a ASA. Velice zajímavých výsledků bylo dosaženo s částečně pružným materiálem Flexfill 98a.

Vícehodinový tisk reálných prototypů nebyl dlouhou dobu úspěšný, proto byl krátce testován také program Simplify3D ke generování G-kódu. Jeho největší přednosti se projeví při optimalizaci podpor.

Experimentální část ovlivnila dlouhá čekací doba na dodání potřebných komponentů v řádu měsíců.

Značný vliv na tisk měla kvalita vstupních dat. Oprava rozbité geometrie 3D modelu byla časově náročná. K opravě poškozených dat byl využit CAD systém Creo 3 s využitím funkce Import data doctor. Bylo také nutné často optimalizovat nastavení tisku před vygenerováním G-kódu v programu Slic3r.

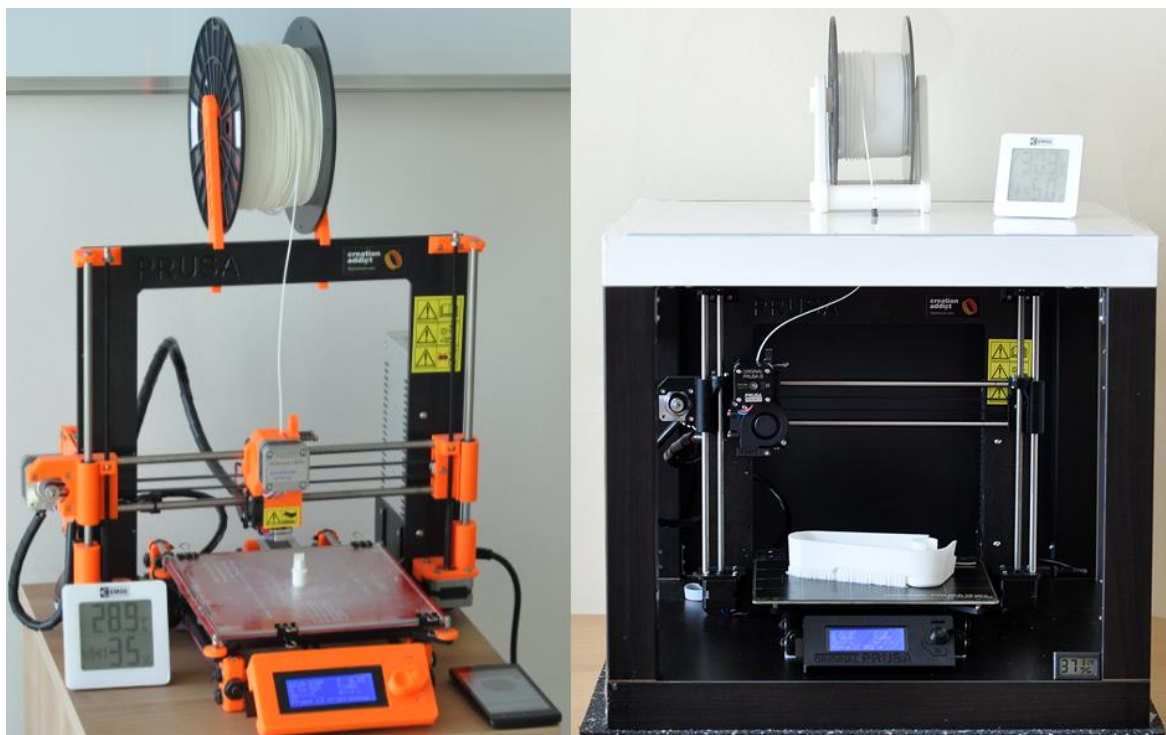
Práce se zabývala také využitelností inovovaného řešení z pohledu firmy Koh-i-noor Formex s.r.o., která se věnuje výrobě a produkci precizních vstřikovacích forem a komplikovaných vstřikovacích dílců pro automobilový průmysl. Potenciální uplatnění inovačního řešení se nabízí při tisku prototypů, který poslouží od kalkulace zakázky a vyjasňování technických problémů se zákazníkem, až po odstříknutí prvního dílu z hotové formy. Velký potenciál nabízí 3D tiskárna při výrobě přípravků pro měření na 3D skeneru a 3D souřadnicovém zařízení. Prototyp může pomoci pro správné zvolení obalu pro sériově vyráběné díly. Další využití se nabízí v marketingu nebo při rychlém zhotovení informativních štítků. Při použití odolných materiálů, jako je ABS, ASA, PC a nylon, představuje inovovaná tiskárna vhodný nástroj využitelný pro údržbu lisovny i pro nástrojárnu, protože je možné velmi rychle zhotovovat jednoduché náhradní díly, různé krytky a držáky.

V domácnosti je možné s minimálními náklady vyrábět originální dárky, obaly na mobilní telefon, různé příslušenství do domácnosti, ale i funkční finální díly, které můžeme mechanicky zatěžovat. Experiment prokázal, že inovovaná 3D tiskárna najde uplatnění jak v domácnosti, tak i ve výrobní společnosti.

Sestavení 3D tiskárny a boxu probíhalo svépomocí. Box není certifikován. Je tedy nutné dbát na bezpečnost a vhodné umístění 3D tiskárny v domácnosti i ve firmě.

RepRap není vhodný pro každého uživatele. Při reálném využití v praxi vyžaduje toto řešení manuální zručnost, technické znalosti, prostorovou představivost, znalost CAD konstruování a vlastností materiálů, zkušenosti s přípravou programů pro tisk včetně přípravy podpor, a také trpělivost.

Přes všechny komplikace, které nastaly během experimentální části lze závěrem konstatovat, že všechny vytčené cíle diplomové práce byly splněny.



Obr. 76 Porovnání stávajícího a inovovaného řešení 3D tiskárny typu RepRap.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Karel Čapek: R.U.R. *Český rozhlas* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.radioteka.cz/detail/CRo_xml_12054653/Karel-Capek-Karel-Capek-R-U-R/
2. *Aditivní výroba* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/aditivni-vyroba/>
3. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-2- 4-4025.
4. SLOTA , J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
5. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In *Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004*. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
6. KOŠTURIÁK, Ján, Jan MAŠEK, Martin TVARŮŽEK a Tomáš MICHÁLEK, MSC. *Inovace 2015, Téma 7: Role technologie 3D tisku v inovačním procesu* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-2015-tema-7-role-technologie-3d-tisku-v-inovacnim-procesu.html>. Kód článku: 170421 Vyšlo v MM : 2017 / 4, 12.04.2017 v rubrice Trendy / Moderní výrobní technologie, Strana 53.
7. ZÍTKA, Lukáš. *Racionalizace technické přípravy výroby dané součásti*. Zlín 2015. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Baťi ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. 79 s. 4 přílohy. Vedoucí práce: Ing. Jiří ČOP.
8. Aditivní technologie – metody Rapid metody Rapid Prototyping [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_meto_dy_Rapid_Prototyping.pdf
9. HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ*, o.s. [online]. 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/
10. TESAŘ, Jaroslav. *Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 3 přílohy. Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
11. PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. 2014 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
12. PrusaResearch. *Prusa Research s. r. o. - 3D tisk a 3D tiskárny* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: www.prusa3d.cz

13. *RepRap* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: www.reprap.org
14. GEBHARDT, Andreas. *Rapid Prototyping*. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 3-446-21259-0.
15. GEBHARDT, Andreas. *Rapid Prototyping*. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 3-446-21259-0.
16. Vývoj a výroba plastových a kovových prototypů technologií Rapid Prototyping [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/>
17. Funkční plastové díly bez použití forem [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/aditivni-vyroba/system-freeformer/>
18. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <https://kylestetzerp.wordpress.com/category/printing-technologies/laser/>
19. *Building an Acetone Vapor Bath for Smoothing 3D-Printed Parts* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>
20. Aditivní výroba a 3D tisk. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-vyroba-a-3d-tisk.html>
21. *Slic3r: G-code generator for 3D printers* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>
22. *3D PRINTING VS. CNC RAPID PROTOTYPING* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.kaso.com/news/2012/december/3d-printing-vs-cnc-rapid-prototyping-there-clear-winner>
23. *Konstrukter: Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
24. *RAPID PROTOTYPING / HISTORY / PROTOTYPING TECHNOLOGIES: History of Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2017-05-20].
25. *Hospodářské noviny: Český výrobce 3D tiskáren Prusa letos více než ztrojnásobí obrát na 210 milionů korun* [online]. 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://byznys.ihned.cz/c1-65527870-cesky-vyrobce-3d-tiskaren-prusa-letos-vice-nez-ztrojnasobi-obrat-na-210-milionu-korun>
26. *KOLIK DECIBELŮ ŠKODÍ* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.auris-audio.cz/kolik-decibelu-skodi>
27. *Koh-I-Noor Formex s.r.o.* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.kinmachinery.cz/formex/o-spolecnosti>
28. ZLÁMAL, Radomír. *Využití FDM 3D tisku pro výrobu dílenských přípravků*. Zlín 2015. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Baťi ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. 74 s. 1 příloha. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav MALOCH, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Zkratka****Popis**

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren – amorfní termoplastický kopolymer
APF	Arburg Plastic Freeforming – označení technologie RP
AM	Additive Manufacturing – aditivní výroba
ASA	Akrylonitrilstyrenakryl – amorfní termoplastický kopolymer
BPM	Ballistic Particle Manufacturing – technologie Rapid prototyping
CAD	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CNC	Computer Numerical Control – označení číslicově řízeného stroje
DMLS	Direct Metal Laser Sintering - označení technologie RP
DLF	Direct Laser Forming – technologie Rapid prototyping
DSPC	Direct Shell Production Casting – technologie Rapid prototyping
FDM	Fused Deposition Modeling - označení technologie RP
LOM	Laminated Object Manufacturing – označení technologie RP
MJM	Multi Jet Modeling – označení technologie RP
NC	Numerical Control – všeobecné označení číslicově řízeného stroje
Obr.	Obrázek
PC	Personal Computer – osobní počítač
RE	Reverse Engineering – reverzní (zpětné) inženýrství
RP	Rapid Prototyping – rychlá výroba prototypů
RepRap	Replicating rapid prototyper –schopnost sebereplikace a rychlého
SGC	Solid Ground Cutting – označení technologie RP
SLA	Stereolitografie - označení technologie RP
SLS	Selective Laser Sintering - označení technologie RP
STL	Standard Triangulation Language – formát podporovaný 3D tiskárnami
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
tzv.	Takzvaný
UV	Ultraviolet – ultra fialové záření
viz	Odkaz na stránku
2D	Two Dimensional „dvourozměrný“
3D	Three Dimensional „trojrozměrný“

Symbol	Popis
[mm/s]	milimetry za sekundu
[mm]	milimetry
[Kč]	Koruna česká
[%]	procento
[° C]	stupně celsia
[cm]	centimetry
[cm ³]	centimetry krychlové
[hod]	hodina
[Kč/cm ³]	Korun českých za centimetr krychlový
C _{3D}	celková cena 3D tisku
C _{MAT}	cena materiálu na vytištěný model
C _E	cena za energie
C _O	náklady na obsluhu 3D tiskárny
TT	doba tisku
E	náklady na energie za hodinu tisku
CH	hodinová mzda obsluhy 3D tiskárny

